В. Т. РЕННЕ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОНДЕНСАТОРЫ



ГОСЭНЕРГОИЗДАТ
1947

В. Т. РЕННЕ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОНДЕНСАТОРЫ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ЛЕНИНГРАД 1947 МОСКВА

ЭС 5-3

В книге содержатся важнейшие сведения о свойствах, технологии и конструкции основных типов электрических конденсаторов. Необходимое место уделено также материалам, применяемым в конденсаторном производстве.

Книга предназначена для инженеров и техников-электриков, применяющих или изготовляющих конденсаторы, а также для студентов старших курсов электротехнических втузов и техникумов, желающих углубить свои знания в этой области электроизоляционной техники.

Книга может быть полезна и для инженеров неэлектротехнических специальностей, сталкивающихся в своей практической деятельности с электрическими конденсаторами.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение

ПРЕДИСЛОВИЕ

Электрический конденсатор представляет собой изделие, чрезвычайно широко применяемое в аппаратуре слабого тока и в сильноточных устройствах.

Развитие нашей электропромышленности, предусмотренное законом о пятилетнем плане восстановления и развития народного хозяйства СССР на 1946—1950 гг., повлечет за собой дальнейшее расширение применения конденсаторов в различных отраслях народного хозяйства. Крупными потребителями конденсаторов явятся радиолокационная техника и техническая электроника.

С вопросами применения электрических конденсаторов, с проектированием новых изделий, основанных на конденсаторном принципе или включающих в себя конденсаторы в качестве важных вспомогательных элементов, а также с производством конденсаторов уже сейчас приходится иметь дело широкому кругу лиц. На протяжении ближайших лет этот круг лиц будет все более расширяться.

Отсутствие специальной книги по электрическим конденсаторам в этих условиях часто создает затруднения, усугубляемые большим разнообразием существующих типов конденсаторов. Издание настоящей книги имеет целью помочь преодолению этих затруднений.

В основу книги положен конспект лекций по курсу „Электрические конденсаторы", читанному автором в 1939—40 гг. на электромеханическом факультете Ленинградского Политехнического института имени М. И. Калинина. Книга была составлена в суровых условиях военного времени, что не позволило автору расширить ее до желательного объема. Пришлось ограничиться лишь небольшими добавлениями по сравнению с конспектом лекций, отразив основные изменения и достижения в технике конденсаторостроения, имевшие место в последние годы.

Автор все же надеется, что и в таком сильно сжатом виде книга принесет пользу, заполнив пробел в нашей специальной литературе по электрическим конденсаторам.

Критические замечания по настоящей книге автор просит направлять либо в Издательство (Ленинград, Невский пр., 28, Госэнергоиздат), либо непосредственно ему (Ленинград, 21, дор. в Сосновку, 1/3, ЛПИ, 1-й профессорский дом, кв. 14).

Автор.

ВВЕДЕНИЕ

§ 1. Основная терминология

Электрическим конденсатором называется система из двух или более проводников (называемых обкладками), разделенных диэлектриком, при техническом применении которой используется ее электрическая емкость.

Название „конденсатор" для такой системы впервые ввел Вольта в 1782 году [1].[1] В то время еще господствовало представление о существовании „электрических жидкостей", и конденсатор рассматривался как прибор, служащий для конденсирования, сгущения этих жидкостей. Теперь термин „конденсатор" нельзя считать вполне правильным, но он еще сохраняет право гражданства на всех языках. В американской и английской литературе начали применять новый термин: capacitor (буквально. емкостник), но этот термин еще не получил общего признания.

Конденсатором постоянной емкости называется конденсатор, в конструкции которого не предусмотрена возможность изменения емкости.

Переменным конденсатором называется конденсатор, конструкция которого позволяет плавно изменять его емкость. Полупеременным, подстроечным, или подгоночным, конденсатором называется конденсатор, конструкция которого дает возможность изменения его емкости с последующим закреплением подвижной части конденсатора, обеспечивающим постоянство установленного при подгонке значения емкости. Его называют также триммером.

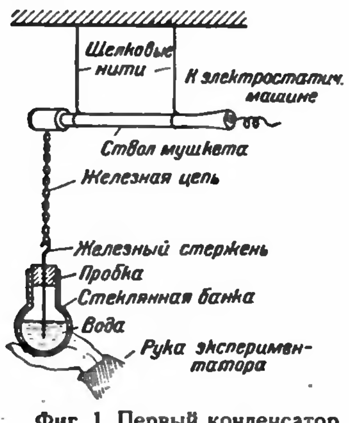
Набор конденсаторов постоянной емкости, снабженный переключающим устройством, позволяющим изменять ступенями суммарную емкость набора, называется магазином емкости.

§ 2. Краткий обзор истории конденсаторостроения

Первые электрические конденсаторы были изготовлены в середине XVIII века, т. е. около 200 лет назад. Идея о необходимости изолировать проводник для накопления

[1] Цифры в квадратных скобках — ссылки на литературные источники, перечень которых помещен в конце книги.

на нем заряда была впервые высказана французом Дезагюлье в 1739 году. Практическая реализация этой идеи, в виде изготовления прибора, явившегося праотцом современных конденсаторов, была выполнена в 1746 году голландцем Ван-Мушенброком, профессором Лейденского университета (фиг. 1). Позже этот прибор был упрощен: от него осталась лишь наиболее существенная часть—стеклянная банка, внутреннюю и наружную часть которой обклеивали металлической фольгой. В таком виде этот прибор, называемый Лейденской банкой, применяется в наше время в школьных лабораториях.



Фиг. 1. Первый конденсатор Ван Мушенброка

Первые электрические конденсаторы применялись только в качестве научных игрушек; разрядом конденсатора заставляли подпрыгивать людей, убивали насекомых и мелких птиц и т. д. В начале XIX века изучение конденсаторов было поставлено Фарадеем на научную основу. В связи с этим единица емкости получила название „фарада".

В середине XIX века наряду со стеклянными конденсаторами начали применять слюдяные (предложены итальянцем Маттеучи в 1845 году) и бумажные (предложены англичанами Морисом и Уиром в 1861 году).

Практическое применение конденсаторов в технике связи началось в 1875—80 годах, а в технике сильных токов—в 1890—92 годах. В 1894—96 годах появились первые образцы электролитических конденсаторов, которые позже нашли большое применение в радиотехнике.

В начале XX века началось широкое развитие конденсаторостроения; последнее постепенно выделилось в самостоятельную отрасль электротехнической промышленности. После окончания первой мировой войны в Западной Европе и в Америке был создан ряд фирм, специализировавшихся на изготовлении конденсаторов (в Англии—„Дюбилье", во Франции— „Треву", в Германии—„Гидра", в США— „Солар," „Аэровокс", „Корнел—Дюбилье"[1] и т. д.).

Развитие конденсаторостроения сопровождалось резким увеличением ассортимента конденсаторов и непрерывным улучшением их качества, достигавшегося в значительной степени путем ужесточения требований, предъявляемых

[1] Фирма „Корнел—Дюбилье" начала свою деятельность еще в 1910 г.

к сырым материалам. Для удовлетворения потребностей конденсаторостроения смежные отрасли промышленности поставили производство ряда материалов, специально предназначенных для изготовления конденсаторов. За период с 1925 по 1940 год заграничная промышленность освоила выпуск особо тонкой конденсаторной бумаги (толщиной 6...7 микрон), специальных пропиточных масс с повышенной диэлектрической проницаемостью (хлорированные и гидрогенизированные вещества), особо рафинированного алюминия для электролитических конденсаторов (99,90...99,99% Al), специальных керамических масс с высокой диэлектрической проницаемостью и малым углом потерь и т. д.

Производство конденсаторов достигло особенно больших масштабов в США. В 1940 году в этой стране изготовлением конденсаторов занимались 72 фирмы, из которых 11—12 специализировались только на выпуске конденсаторов. В 1941 году только для использования в радиоприемной аппаратуре в США было изготовлено 276 миллионов конденсаторов [7].

Царская Россия не имела своего конденсаторного производства; небольшое количество конденсаторов, потреблявшееся в то время в нашей стране, частью импортировалось, частью изготовлялось кустарным порядком. Отечественное производство электрических конденсаторов зародилось только после Октябрьской революции и окончания гражданской войны. Сначала изготовление конденсаторов велось лишь в подсобных цехах заводов электрослаботочной промышленности, выпускавших конденсаторы только для целей техники связи: воздушные, слюдяные и бумажные. Производство конденсаторов применяло импортное сырье, что сильно задерживало развитие отечественного конденсаторостроения. С 1929 года начали применять отечественную слюду; в 1932—35 годах были освоены отечественные конденсаторная бумага и конденсаторная фольга; в это же время были разработаны и несколько позже внедрены в производство специальные пропиточные массы: галовакс и совол. Создание отечественной сырьевой базы позволило резко расширить выпуск слюдяных и бумажных конденсаторов слаботочного типа.

В 1932 году был освоен выпуск бумажно-масляных конденсаторов, применяемых для улучшения коэфициента мощности в технике сильных токов. В 1935 году был начат выпуск электролитических конденсаторов, а в 1937 году начато серийное изготовление высокочастотных конденсаторов из специальной керамики.

В настоящее время в СССР изготовляются все основные типы электрических конденсаторов, но масштабы производства как по ассортименту, так и по количеству не могут

пока полностью удовлетворить все возрастающую потребность нашей страны в этом виде электротехнической продукции. Вопрос о резком расширении отечественного конденсаторостроения разрешается в настоящее время созданием ряда специализированных конденсаторных заводов, которые должны обеспечить конденсаторами не только нашу промышленность, но и широкие массы радиолюбителей.

§ 3. Основные области применения конденсаторов

В течение первого столетия с момента своего появления электрический конденсатор являлся или объектом физических исследований, или вспомогательным прибором при лабораторных работах. С середины прошлого века конденсатор применяется как один из наиболее существенных элементов в технике связи; особенно широкое применение конденсатор находит с развитием радиотехники. Современная американская радиопромышленность потребляет свыше 1 миллиона конденсаторов в сутки.* Наряду с этим уже на протяжении 40—50 лет электрический конденсатор с успехом используется для разнообразных целей и в технике сильных токов. Уже в 1932 году мощность сильноточных конденсаторов, установленных в США, превышала 1 000 000 kVAR; к концу 1946 г. установленная мощность конденсаторов в этой стране достигла 8 000 000 kVAR.

Кроме того конденсаторы находят применение в ряде неэлектротехнических отраслей промышленности и техники.

В технике слабых токов и в технике связи конденсаторы применяют для следующих основных целей [2]:

1) в радиотехнике: для создания колебательных контуров, для настройки, для разделения токов разной частоты, для блокировки, в специальных схемах радиолокаций и т. д.;

2) в телефонии и телеграфии: для разделения цепей постоянного и переменного токов, для разделения токов разной частоты, для искрогашения в контактах, для симметрирования кабельных линий связи и т. д.;

3) в автоматике и в телемеханике: для разделения цепей постоянного и пульсирующего токов, для искрогашения в контактах, в схемах тиратронных генераторов импульсов и т. д.;

4) в измерительной технике: для создания эталонов емкости, для получения переменной емкости (магазины емкости и переменные конденсаторы), для создания спе-

* В. Т. Ренне, „Современное конденсаторостроение", Эл-во, 1946, № 8, стр. 19.

циальных измерительных приборов на конденсаторном принципе и т. д.

В технике сильных токов и высоких напряжений конденсаторы применяют для следующих целей [3]:

1) для улучшения коэфициента мощности промышленных установок (статические или шунтовые конденсаторы);

2) для регулирования напряжения на распределительных линиях путем последовательного включения конденсаторов в линию (сериесные конденсаторы);*

3) для емкостного отбора энергии от линии передачи при помощи конденсаторного делителя напряжения;

4) для защиты от перенапряжений;

5) для применения в схемах импульсных генераторов высокого напряжения;

6) для кратковременного получения большой силы тока при испытании электротехнической аппаратуры (выключатели и т. д.) и для целей электросварки;

7) для устранения радиопомех, создаваемых электрическими машинами и аппаратами и подвижным составом электрифицированного транспорта (защитные конденсаторы);

8) для пуска однофазных электродвигателей (стартерные конденсаторы).

В неэлектротехнических областях техники конденсаторы применяют для следующих основных целей:

1) в медицинской технике — в рентгеновской аппаратуре, в устройствах электротерапии и т. д.;

2) в автотракторной технике — в схемах зажигания для искрогашения в контактах;

3) в специальной военной технике: в средствах подрыва, в специальных типах боеприпасов и т. д. [8].

Разнообразие областей применения конденсаторов обусловливает большое разнообразие типов конденсаторов, изготовляемых современной промышленностью.

Поэтому наряду с миниатюрными конденсаторами для радиоприемной аппаратуры, имеющими вес в несколько граммов и размеры порядка нескольких миллиметров, можно встретить громоздкие конденсаторы, рассчитанные на непосредственное подключение к линии высокого напряжения и имеющие высоту больше человеческого роста при весе порядка 1 тонны.

§ 4. Классификация конденсаторов

Свойства, конструкция и область применения всякого конденсатора в максимальной степени определяются диэлектриком, разделяющим его обкладки. Поэтому конден-

---

* F. Butler, C. Concordia, „Analysis of series capacitor application problem", El. Engineering, 1937, № 8, p. 975.

саторы удобнее всего классифицировать по роду диэлектрика. В соответствии с этим можно привести следующую схему классификации конденсаторов:

I. Конденсаторы с газообразным диэлектриком

1. Воздушные конденсаторы с атмосферным давлением.
2. Конденсаторы, наполненные сжатым газом.
3. Вакуумные конденсаторы.

II. Конденсаторы с жидким диэлектриком

4. Маслонаполненные конденсаторы.

III. Конденсаторы с твердым неорганическим диэлектриком

5. Стеклянные конденсаторы.
6. Кварцевые конденсаторы.
7. Слюдяные конденсаторы.
8. Серные конденсаторы.
9. Керамические конденсаторы: а) фарфоровые, б) высокочастотные, из специальной керамики.

IV. Конденсаторы с твердым органическим диэлектриком

10. Бумажные конденсаторы: а) с твердой пропиткой, б) с полужидкой пропиткой, в) с жидкой пропиткой.
11. Конденсаторы с диэлектриком из искусственных органических пленок: а) целлоновые, б) стирофлексные, в) лектрофильмовые.

V. Конденсаторы с твердым диэлектриком, работающим в контакте с электролитом

12. Электролитические конденсаторы: а) жидкостные (мокрые), б) сухие.

ГЛАВА I

ОБЩИЕ СВОЙСТВА КОНДЕНСАТОРОВ

§ 5. Емкость

Основное свойство конденсатора — его емкость, т. е. способность накапливать на обкладках электрический заряд, характеризуется отношением заряда Q к величине напряжения U, приложенного к обкладкам:

$$C = \frac{Q}{U}. \tag{1}$$

Выражая Q в кулонах и U в вольтах, получаем C — в фарадах (F). Фарада слишком крупная единица, а потому обычно пользуются меньшей единицей — микрофарадой (μF).

$$1\ \mu F = 1 \cdot 10^{-6} F$$

или еще меньшей единицей — микромикрофарадой ($\mu\mu$F)

$$1\ \mu\mu F = 1 \cdot 10^{-6}\ \mu F = 1 \cdot 10^{-12} F.$$

В заграничной практике микромикрофараду часто называют пикофарадой (pF)

$$1\ pF = 1\ \mu\mu F.$$

Иногда применяется также единица емкости, называемая нанофарадой (nF)

$$1\ nF = 1000\ pF = 1 \cdot 10^{-3}\ \mu F = 1 \cdot 10^{-9}\ F.$$

В ряде случаев пользуются абсолютной электростатической единицей емкости — сантиметром (cm). Емкостью в 1 cm обладает металлический шар, имеющий радиус, равный 1 сантиметру и бесконечно удаленный от охватывающей его проводящей шаровой поверхности. Эта единица емкости близка к микромикрофараде:

$$1\ cm = 1{,}11\ \mu\mu F; \quad 1\ \mu\mu F = 0{,}9\ cm.$$

Емкость современных конденсаторов обычно лежит в пределах от нескольких $\mu\mu$F до нескольких тысяч μF.

Емкость всякого конденсатора зависит от его геометрических размеров (площади обкладок и расстояния между ними) и от рода диэлектрика, разделяющего обкладки (от величины диэлектрической проницаемости).

В простейшем случае (плоский конденсатор с двумя обкладками) емкость конденсатора выражается общеизвестной формулой:

$$C = \frac{\varepsilon S}{4\pi d}, \qquad (2)$$

где

ε — диэлектрическая проницаемость диэлектрика,
S — площадь обкладок в cm^2,
d — толщина диэлектрика (расстояние между обкладками) в cm.

Если плоский конденсатор собран из n обкладок, соединенных через одну параллельно, то его емкость будет равна:

$$C = \frac{\varepsilon S (n-1)}{4\pi d}. \qquad (3)$$

Наряду с плоским конденсатором иногда применяют цилиндрический, представляющий собой два коаксиальных проводящих цилиндра, разделенных диэлектриком. Емкость такого конденсатора равна:

$$C=\frac{\varepsilon l}{2\ln\frac{R_1}{R_2}}=0{,}217\frac{\varepsilon l}{\lg_{10}\frac{R_1}{R_2}}, \tag{4}$$

где

l — длина цилиндров в cm,
R_1—радиус наружного цилиндра (наружной обкладки) в cm,
R_2—радиус внутреннего цилиндра (внутренней обкладки) в cm.

При подсчетах по формулам (2—4) значение емкости получается в абсолютных электростатических единицах — сантиметрах.

Конденсаторы часто применяют в виде групп, составленных из параллельно или последовательно соединенных единиц. При параллельном соединении общая емкость группы равна сумме емкостей отдельных единиц:

$$C_{\Sigma}=C_1+C_2+C_3+\ldots C_n. \tag{5}$$

При последовательном соединении величина обратная общей емкости группы равна сумме обратных величин емкостей отдельных единиц:

$$\frac{1}{C_{\Sigma}}=\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}+\frac{1}{C_3}+\ldots\frac{1}{C_n}. \tag{6}$$

При последовательном соединении n конденсаторов одинаковой емкости общая емкость группы будет в n раз меньше емкости каждого конденсатора, входящего в группу.

При сложном последовательно-параллельном соединении конденсаторов общую емкость находят, применяя формулы (5—6) к отдельным участкам схемы и постепенно упрощая последнюю.

§ 6. Поляризация диэлектриков

Влияние рода диэлектрика на величину емкости конденсатора обусловлено различной интенсивностью явления поляризации в различных диэлектриках. Поляризация диэлектрика объясняется тем, что при создании электрического поля в диэлектрике в последнем происходит смещение электрических зарядов по направлению к металлическим обкладкам, наложенным на диэлектрик для создания поля.

В соответствии с характером смещающихся в диэлектрике зарядов различают три основных типа поляризации:

1) Электронную, обусловленную смещением электронов в атомах диэлектрика в сторону положительно заряженной обкладки.

2) Дипольную, обусловленную поворотом дипольных молекул. (Дипольная молекула обладает электрической несимметрией: в одной части ее преобладает положительный заряд, в другой — отрицательный. Это создает электрический момент, вызывающий поворот молекулы при воздействии электрического поля.)

3) Ионную, обусловленную смещением связанных ионов, расположенных в узлах кристаллической решетки некоторых диэлектриков или полусвободных ионов, слабо связанных адсорбционными силами.

Электронная поляризация присуща всем диэлектрикам.

Другие виды поляризации могут накладываться на электронную поляризацию, если в диэлектрике присутствуют дипольные молекулы или ионы.

При электронной поляризации или поляризации, обусловленной ионами, связанными в кристаллической решетке, смещение зарядов в диэлектрике имеет полностью обратимый характер и происходит мгновенно. При других типах поляризации это явление не полностью обратимо: после удаления напряжения и разряда обкладок не все заряды возвращаются в исходное положение, или, во всяком случае, для этого требуется известный промежуток времени. Для конденсатора, изготовленного из диэлектрика с таким типом поляризации, характерно появление „остаточного заряда“, накапливающегося на обкладках после того, как напряжение с них снято и они разряжены кратковременным замыканием накоротко.

Способность диэлектрика поляризоваться в электрическом поле характеризуется его диэлектрической проницаемостью ε, представляющей собой отношение величины электрического смещения D к напряженности электрического поля E.

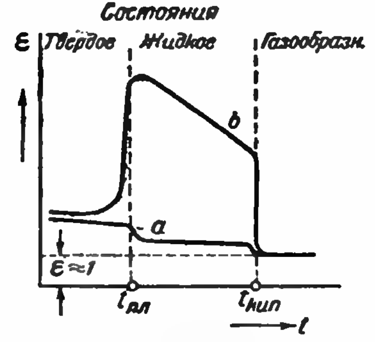
$$\varepsilon = 4\pi \frac{D}{E}. \tag{7}$$

Чем сильнее поляризуется диэлектрик, тем больше будет емкость изготовленного из него конденсатора, так как смещающиеся в диэлектрике заряды связывают часть зарядов на обкладках и позволяют увеличить общий заряд конденсатора при неизменных его геометрических размерах и одном и том же значении приложенного к обкладкам напряжения.

§ 7. Зависимость емкости от температуры и влажности

Изменение емкости конденсаторов при воздействии различных внешних факторов в значительной степени определяется изменениями диэлектрической проницаемости диэлектрика, созданными воздействием этих факторов. Характер зависимости емкости от температуры обычно обусловлен характером кривой $\varepsilon = f(t)$, присущим диэлектрику, разделяющему обкладки конденсатора.

Диэлектрик с электронной поляризацией снижает ε при повышении температуры за счет уменьшения плотности вещества (фиг. 2); резкое изменение плотности при изменении агрегатного состояния вещества сопровождается скачкообразным изменением ε.



Фиг. 2. Зависимость диэлектрической проницаемости от температуры

a—диэлектрик с электронной поляризацией; *b*—диэлектрик с дипольной поляризацией

Диэлектрик с дипольной поляризацией при расплавлении увеличивает ε, так как в большинстве случаев при твердом состоянии вещества дипольные молекулы не могут поворачиваться, и только резкое снижение вязкости, после перехода вещества в жидкое состояние, дает им возможность принять участие в процессе поляризации.

В области жидкого состояния дипольные диэлектрики уменьшают ε при повышении температуры, так как усиливающееся тепловое движение молекул затрудняет их правильную ориентацию в электрическом поле. При переходе в газообразное состояние, вследствие резкого снижения плотности, ε падает до значения близкого к единице.

Некоторые диэлектрики обладают дипольной поляризацией и в твердом состоянии. Поляризация таких диэлектриков часто обусловлена поворотом отдельных полярных частей молекулы по отношению ко всей молекуле в целом, остающейся неподвижной. К веществам такого типа относятся, например, клетчатка и галовакс.

Твердые диэлектрики, обладающие ионной поляризацией, обычно увеличивают ε при повышении температуры, но в отдельных случаях может наблюдаться и снижение ε.

В самое последнее время был открыт новый особый тип ионной поляризации в одном из керамических материалов, для которого характерны исключительно высокие значения, превышающие 1000. Для этого материала наблюдается весьма резкая зависимость ε от температуры, а в не-

которых условиях—и от величины напряженности электрического поля [8a].

Зависимость емкости конденсатора от температуры может быть также обусловлена особенностями его конструкции и изменениями его размеров при нагревании. Расширение обкладок приводит к увеличению емкости, а увеличение толщины диэлектрика — к уменьшению емкости.

Температурную зависимость емкости конденсаторов характеризуют величииой температурного коэфициента емкости:

$$\alpha_t = \frac{C_2 - C_1}{C_1\,(t_2 - t_1)} \cdot 100 \quad [\%/\mathrm{grad}], \tag{7a}$$

где

C_1 — емкость при комнатной температуре t_1 (обычно $+15...25°C$);

C_2 — емкость при повышенной температуре t_2 (обычно при верхнем пределе рабочей температуры конденсатора).

Вода имеет высокое значение диэлектрической проницаемости, порядка 80, заметно превышающее значение ε диэлектриков, обычно применяемых в конденсаторостроении.

Поэтому, если диэлектрик гигроскопичен, то при воздействии влажности окружающей среды емкость конденсатора заметно увеличивается. Такой же результат, но в более слабой степени, наблюдается при осаждении влаги на поверхности негигроскопичного диэлектрика. Поэтому для обеспечения стабильности емкости в условиях переменной влажности следует принимать специальные меры для защиты конденсатора от проникновения внутрь него влаги.

§ 8. Конденсатор в цепи постоянного тока. Заряд конденсатора

При включении напряжения U на выводы конденсатора емкостью C, между обкладками создается электрическое поле и в диэлектрике происходит смещение зарядов. Одновременно по проводникам, соединяющим обкладки с зажимами источника электроэнергии, проходит электронный ток, равный току смещения в диэлектрике (зарядный ток конденсатора). При этом конденсатор приобретает запас электроэнергии, равный:

$$A = \frac{CU^2}{2}, \tag{8}$$

где A выражено в эргах или Ws, C — в F и U — в V.

В момент включения напряжения происходит бросок тока, величина которого равна:

$$i_o = \frac{U}{r}, \quad (9)$$

где i_o — начальное значение силы тока в А, и r — сопротивление зарядной цепи в Ω (обкладки, соединительные провода и внутреннее сопротивление источника энергии).

Далее сила тока постепенно спадает, стремясь к нулю, согласно уравнению:

$$i = i_o e_n^{-\frac{\tau}{rC}}, \quad (10)$$

где τ — время в секундах и e_n — основание натуральных логарифмов.

В то же время напряжение на зажимах конденсатора U_c возрастает, асимптотически приближаясь к величине напряжения на зажимах источника электроэнергии (фиг. 3).

$$U_c = U\left(1 - e_n^{-\frac{\tau}{rC}}\right). \quad (11)$$

Если, кроме сопротивления r, в зарядной цепи имеется также индуктивность L, то характер кривых $i = f(\tau)$ и $U_c = f(\tau)$ будет определяться соотношением параметров зарядной цепи: C, r и L. При соблюдении условия:

$$r \geqslant 2\sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (12)$$

(где r — в Ω, C — в F и L — в H) изменения тока и напряжения носят апериодический характер. Кривая $U_c = f(\tau)$ имеет тот же характер, как и при отсутствии индуктивности (фиг. 3); кривая $i = f(\tau)$ начинается от нуля, проходит через максимум, а затем спадает, асимптотически приближаясь к нулю. Максимум силы тока достигается через промежуток времени: $\tau_0 = \frac{2L}{r}$ (где τ_0 — в секундах при r — в Ω и L — в H).

Если условие (12) не соблюдено, то изменение U_c и i имеют периодический характер (фиг. 4) и определяются уравнениями:

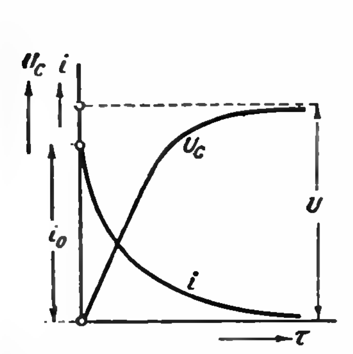
$$i = \frac{U}{\omega_1 L} \cdot e_n^{-\alpha\tau} \cdot \sin \omega_1\tau, \quad (13)$$

$$U_c = U - \frac{U}{\omega_1 \sqrt{LC}} \cdot e_n^{-\alpha\tau} \cdot \sin(\omega_1\tau + \varphi_k), \quad (14)$$

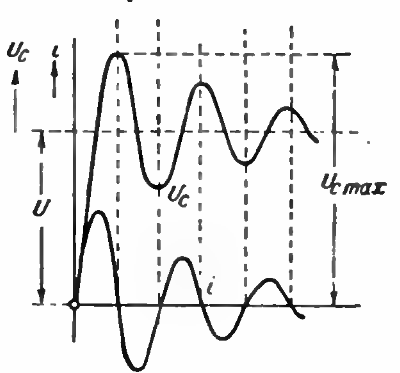
где

$$\alpha = \frac{r}{2L};\quad \omega_1 = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{r^2}{4L^2}} \text{ и } \varphi_k = \operatorname{arctg}\frac{\omega_1}{\alpha}.$$

Максимальная величина напряжения на зажимах конденсатора $U_{c_{max}}$ может достигать значения $2U$. Для предотвращения опасных перенапряжений при включении конденсаторов в цепь, содержащую индуктивность, следует увеличить r с таким расчетом, чтобы было соблюдено условие (12) [9].



Фиг. 3. Заряд конденсатора в цепи постоянного тока, не содержащей индуктивности



Фиг. 4. Заряд конденсатора в цепи постоянного тока, содержащей индуктивность (периодический процесс)

§ 9. Сопротивление изоляции конденсаторов

При заряде реального конденсатора сила тока с течением времени спадает не до нуля, а до некоторого конечного значения — тока утечки i_{ym}. Поделив напряжение U, подведенное к конденсатору, на величину тока утечки, находим сопротивление изоляции конденсатора, т. е. величину сопротивления, оказываемого конденсатором прохождению постоянного тока:

$$R = \frac{U}{i_{ym}}, \tag{15}$$

где R — в MΩ, если U — в V и i_{ym} — в μA.

Сопротивление изоляции доброкачественных конденсаторов весьма велико, а потому его выражают не в омах, а в мегомах (MΩ) или в тераомах (TΩ).

$$1\,\text{M}\Omega = 1\cdot 10^6\,\Omega;\ 1\,\text{T}\Omega = 1\cdot 10^6\,\text{M}\Omega = 1\cdot 10^{12}\,\Omega.$$

Сопротивление изоляции зависит от удельного объемного сопротивления диэлектрика ρ_v, от площади обкладок S и от толщины диэлектрика d:

$$R = \rho_v \cdot \frac{d}{S} \cdot 10^{-6}, \tag{16}$$

где R — в MΩ, ρ_v — в Ω·cm, d — в cm и S — в cm².

Для оценки качества конденсаторов часто применяют величину произведения из сопротивления изоляции на емкость, называемую приведенным сопротивлением изоляции или постоянной времени конденсатора:

$$R' = RC = 0{,}884 \cdot 10^{-12} \rho_v \varepsilon, \tag{17}$$

где R' — в MΩ·μF и ρ_v — в Ω·cm.

Эта величина не зависит от размеров конденсатора и определяется только качеством диэлектрика. Для конденсаторов малой емкости она не является характерной, так как в них ток утечки через толщу диэлектрика мал по сравнению с поверхностными токами утечки по закраинам конденсатора и по изоляции выводов.

При заряде реального конденсатора сила тока обычно спадает со временем значительно медленнее, чем это следует из уравнения (10), полученного для идеального конденсатора. Это объясняется тем, что в реальном конденсаторе, наряду с нормальным зарядным током $i_н$, существует аномальный зарядный ток (ток абсорбции) i_a, обусловленный относительно медленным перемещением зарядов в толще диэлектрика (дипольная и ионная поляризации). Поэтому для полного зарядного тока реального конденсатора можно написать уравнение [10]:

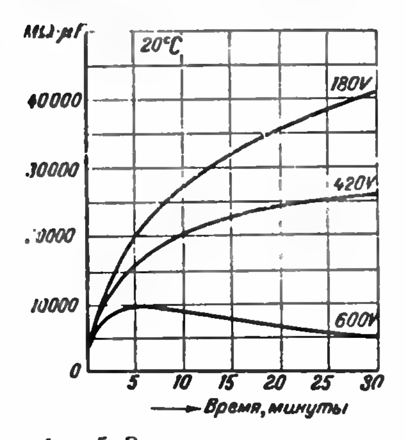
$$i_\Sigma = i_н + i_a + i_{ут} = \frac{U}{r} e_н^{-\frac{\tau}{rC}} + f(\tau) + k. \tag{18}$$

Измерение сопротивления изоляции конденсаторов обычно производят при таких значениях времени, которые недостаточны для того, чтобы ток, протекающий через конденсатор, достиг установившегося значения $i_{ут} = k$, не зависящего от времени. Поэтому сопротивление изоляции, вычисленное делением напряжения на измеренную силу тока, резко зависит от времени (фиг. 5).

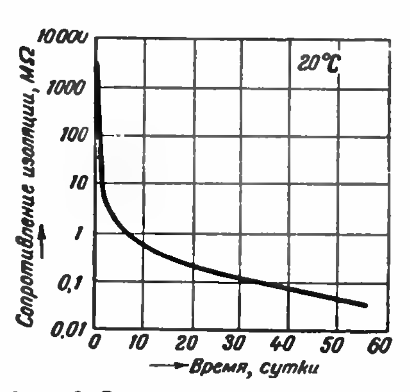
При повышении напряжения сопротивление изоляции конденсаторов уменьшается и замедляется его возрастание со временем; воз астание может даже замениться снижением (фиг. 5). Это объясняется тем, что при повышенном напряжении часть адсорбционно связанных ионов переходит в свободное состояние, увеличивая постоянную во вре-

мени составляющую тока $i_{ут}$ за счет составляющей, зависящей от времени i_a. Кроме того, может оказывать влияние также нагрев „слабых мест“ диэлектрика током утечки.

Повышение температуры вызывает усиление диссоциации молекул и увеличивает количество свободных ионов в диэлектрике, обусловливающих сквозную проводимость через толщу диэлектрика. Это приводит к росту тока утечки, т. е. к снижению сопротивления изоляции. Зави-



Фиг. 5. Зависимость сопротивления изоляции бумажного конденсатора от времени при разных напряжениях (бумага 2×7μ; вакуумная сушка; пропитка галоваксом) (Ренне)



Фиг. 6. Зависимость сопротивления изоляции бумажного конденсатора от времени пребывания при относительной влажности окружающего воздуха 95% (пропитка парафином; защиты от влажности нет) (Ренне)

симость логарифма сопротивления изоляции конденсатора от температуры имеет вид падающей прямой линии; эту зависимость можно выразить уравнением [8]:

$$\lg R_{t_2} = \lg R_{t_1} - b(t_2 - t_1), \tag{19}$$

где

R_{t_1} — значение сопротивления изоляции при температуре t_1;

R_{t_2} — при t_2, а b — постоянный коэфициент, величина которого определяется температурным коэфициентом удельного сопротивления диэлектрика.

Значение коэфициента b изменяется, когда диэлектрик изменяет свое агрегатное состояние.

Действие влажности вызывает катастрофическое снижение сопротивления изоляции конденсатора (в $10^4...10^6$ раз), если влага проникает в толщу диэлектрика или осаждается на его поверхности, не закрытой обкладками (фиг. 6). Это

объясняется как тем, что вода является полупроводником (удельное сопротивление воды менее 10^6 Ω·cm), так и тем, что наличие воды способствует диссоциации вредных примесей в диэлектрике и увеличивает число свободных ионов. Поэтому, если от конденсатора требуется высокое сопротивление изоляции, необходимо уделять большое внимание вопросу его защиты от действия влажности.

§ 10. Разряд конденсатора

При замыкании обкладок заряженного конденсатора с емкостью C на сопротивление r потенциальная энергия конденсатора, выражаемая формулой (8), превращается в кинетическую и расходуется на нагрев сопротивления. Напряжение на зажимах конденсатора при этом быстро падает по закону:

$$U_C = U e_n^{-\frac{\tau}{rC}}, \qquad (20)$$

где U_C и U — в V, τ — в секундах, r — в Ω и C — в F. Во время этого процесса, называемого разрядом конденсатора, сила тока сначала мгновенно достигает значения: $i_0 = \frac{U}{r}$, где U — напряжение, до которого был заряжен конденсатор, а затем спадает, подчиняясь уравнению (10). Мгновенный бросок тока при разряде конденсатора на малое сопротивление используется в технике для кратковременного получения больших значений силы тока.

Зависимость разрядного тока от времени выражается такой же кривой, как и зависимость от времени зарядного тока (фиг. 3), с тем лишь отличием, что значения тока имеют обратный знак.

Скорость спадания U_C и i со временем определяется величиной rC — постоянной времени разрядной цепи.

При $\tau = rC$ имеем: $U_C = U e_n^{-1} = \frac{U}{e_n} \approx 0{,}37 U$.

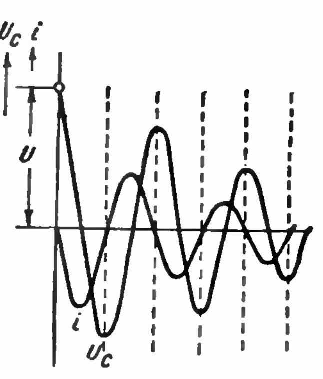
Таким образом постоянная времени численно выражается числом секунд, необходимым для того, чтобы напряжение на конденсаторе упало до 37% от начального значения.

Если оставить обкладки заряженного конденсатора разомкнутыми, то с течением времени напряжение на его выводах все же будет снижаться за счет явления „саморазряда". В данном случае роль внешнего сопротивления играет сопротивление изоляции конденсатора R. Скорость снижения напряжения на конденсаторе в процессе само-

разряда определяется постоянной времени конденсатора RC:

$$U_C = Ue_n^{-\frac{\tau}{RC}}. \quad (21)$$

При наличии в разрядной цепи индуктивности L характер изменения силы тока и напряжения со временем будет зависеть от соотношения параметров цепи: C, r и L. Если соблюдено условие (12), то изменения будут апериодические, подобные тем, которые имеют место при заряде в цепи, содержащей индуктивиость (§ 8); если же условие (12) не соблюдено, то происходят периодические изменения силы тока и напряжения — затухающие колебания (фиг. 7). „Затухание", т. е. уменьшение амплитуды колебаний со временем характеризуется логарифмическим декрементом затухания Δ, который равен натуральному логарифму отношения двух смежных амплитуд силы тока и зависит от параметров разрядной цепи:



Фиг. 7. Разряд конденсатора в цепи, содержащей индуктивность

$$\Delta = \ln \frac{I_n}{I_n + 1} \approx \pi r \sqrt{\frac{C}{L}}, \quad (22)$$

где r — в Ω, C — в F и L — в H.

Частота колебаний при периодическом разряде определяется формулой:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{r^2}{4L^2}}. \quad (23)$$

Увеличение активного сопротивления r, в частности за счет потерь энергии в конденсаторе, увеличивает декремент затухания и уменьшает частоту колебаний.

Физическая сущность колебательного процесса при периодическом разряде заключается в переходе энергии заряженного конденсатора $\frac{CU^2}{2}$ в энергию магнитного поля катушки самоиндукции $\frac{Li^2}{2}$ и обратно. Колебания постепенно затухают за счет поглощения энергии активным сопротивлением r. Принцип получения колебаний применением контура, составленного из конденсатора и катушки самоиндукции, широко используется в радиотехнике.

§ 11. Конденсатор в цепи переменного тока

При включении конденсатора в цепь постоянного тока сила тока быстро спадает до очень малой величины: $i_{ут}$. Практически можно считать, что конденсатор не пропускает постоянного тока. В цепи переменного тока в диэлектрике конденсатора происходит переменное смещение за счет смены процессов заряда и разряда, обусловливающее значительную величину силы тока через конденсатор. Последняя определяется величиной реактивного сопротивления конденсатора:

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}, \qquad (24)$$

где X_C — в Ω, f — в Hz и C — в F.

При высокой частоте реактивное сопротивление конденсаторов даже при малых значениях емкости очень мало, а потому их необходимо рассчитывать на большую силу тока, если напряжение, прикладываемое к конденсатору, будет не слишком мало.

Таким образом конденсатор практически не пропускает постоянного тока, но пропускает переменный ток, причем оказывает для токов высокой частоты меньшее сопротивление, чем для токов низкой частоты. Это свойство конденсаторов широко используется при изготовлении электрических фильтров (разделение постоянной и переменной составляющей выпрямленного тока, разделение токов разной частоты) и при борьбе с радиопомехами, создаваемыми электротехническими устройствами (в данном случае конденсатор служит шунтом для токов высокой частоты).

Применяя конденсаторы при высоких частотах, необходимо учитывать, что конденсатор имеет активное сопротивление r и некоторую индуктивность L.

Последняя особенно заметна у конденсаторов, намотанных из тонких лент диэлектрика (бумажные, стирофлексные).

Для того чтобы учесть наличие в конденсаторе r и L, вместо реактивного сопротивления X_C надо пользоваться полным сопротивлением конденсатора:

$$Z = \sqrt{r^2 + (X_C - X_L)^2} = \sqrt{r^2 + \left(\frac{1}{\omega C} - \omega L\right)^2}. \qquad (25)$$

где Z и r — в Ω, C — в F и L — в H.

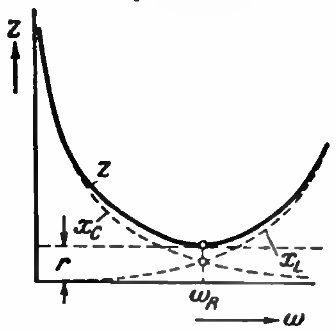
При увеличении частоты X_C снижается, а X_L — растет; поэтому зависимость полного сопротивления конденсатора от частоты имеет U-образный характер (фиг. 8).

При частотах выше некоторого критического значения ω_R (резонансная частота) конденсатор ведет себя уже не как емкость, а как индуктивность.

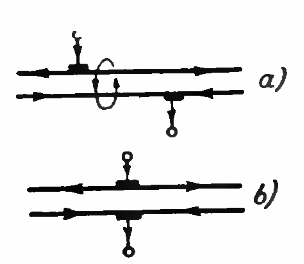
В намотанных конденсаторах индуктивность в значительной степени определяется длиной той части обкладок, которая заключена между выводными контактами (фиг. 9).

В этой части конденсатора направления токов в обеих обкладках в каждый момент времени совпадают; магнитные поля этих токов складываются, и это обусловливает наличие индуктивности.

В остальных частях конденсатора направления токов в обкладках противоположны, и их магнитные поля взаимно



Фиг. 8. Зависимость полного сопротивления конденсатора от частоты



Фиг. 9. Схема развертки намотанного конденсатора
a—выводы сдвинуты: $L \neq 0$;
b—выводы совмещены: $L=0$

уничтожаются. Поэтому индуктивность намотанного конденсатора может быть заметно уменьшена простым сближением его выводных контактов [11; 12].

Заметное влияние активного сопротивления и индуктивности конденсатора на величину его полного сопротивления обычно наблюдается лишь при частотах не ниже $10^5 ... 10^6$ Hz. При меньших частотах для вычисления силы тока, проходящего через конденсатор, можно пользоваться упрощенной формулой:

$$I = \frac{U}{Z} \approx \frac{U}{X_C} = U\omega C = 2\pi f U C, \tag{26}$$

где I — в A, U — в V, C — в F и f — в Hz.

§ 12. Кажущаяся и реактивная мощность конденсатора

При использовании конденсаторов в технике сильных токов приходится встречаться со следующими обозначениями мощности:

$$\text{кажущаяся мощность } P = UI, \tag{27}$$

$$\text{реактивная мощность } P_R = UI \sin\varphi. \tag{28}$$

Выражая U — в kV и I — в A, получаем P_R — в киловольтамперах реактивных (kVAR). В иностранной технической литературе можно иногда встретить и другие названия единицы реактивной мощности: рекиловатт (RkW), килореватт (kRW), блиндкиловольтампер (BkVA), блиндкиловатт (BkW) и килосин (ksin или ks).

Для доброкачественных конденсаторов угол φ — весьма близок к 90°, а $\sin\varphi$ — близок к единице; поэтому

$$P_R \approx P = UI \approx U^2\omega C, \qquad (29)$$

где P_R выражено в VAR, если U — в V, а C — в F.

Для сильноточных конденсаторов вместо емкости часто указывают реактивную мощность. В этих случаях емкость конденсатора можно вычислить по формуле:

$$C = \frac{P_R}{U^2\omega} \cdot 10^3, \qquad (30)$$

где C — в μF, P_R — в kVAR и U — в kV.

При включении сильноточных конденсаторов в цепь трехфазного тока они разбиваются на три группы, соединяемые в звезду или в треугольник. В обоих случаях для вычисления суммарной реактивной мощности можно пользоваться одним выражением:

$$P_R = 3 \cdot 10^{-3} U_C^2 \omega C, \qquad (31)$$

где P_R — в kVAR, U_C — в kV и C — в μF.

В формуле (31) величина U_C представляет собой напряжение, приложенное к выводам конденсатора. При соединении треугольником U_C равно линейному напряжению сети, а при соединении звездой — в $\sqrt{3}$ раз меньше. Поэтому, при одном и том же значении емкости C на каждую фазу, суммарная реактивная мощность трехфазной конденсаторной батареи при соединении в звезду будет в 3 раза меньше, чем при соединении в треугольник.

Поскольку угол сдвига фаз между током и напряжением в конденсаторе близок к 90°, можно считать, что конденсатор потребляет только реактивную мощность.

Это свойство конденсаторов используется для улучшения коэфициента мощности промышленных установок с индуктивной нагрузкой путем параллельного присоединения конденсаторов к отдельным индуктивным приемникам (индивидуальная компенсация) или путем включения конденсаторной батареи на шины подстанции (групповая компенсация). Если угол сдвига фаз индуктивного приемника с активной мощностью P_A надо уменьшить от значения

φ_1 до значения φ_2, то необходимая для этого реактивная мощность конденсатора может быть подсчитана по формуле:

$$P_R = P_A(\operatorname{tg}\varphi_1 - \operatorname{tg}\varphi_2), \qquad (32)$$

где P_R — в kVAR и P_A — в kW.

Особенно большое значение имеет применение конденсаторов для улучшения коэфициента мощности индукционных печей, обладающих очень низким $\cos\varphi$, около 0,1. Конденсаторы, применяемые для улучшения коэфициента мощности промышленных установок, часто называют „статическими", для того чтобы отличить их от применяемых для той же цели перевозбужденных синхронных электродвигателей, называемых „вращающимися конденсаторами".

§ 13. Зависимость емкости от частоты

Применяя конденсатор в цепи переменного тока, особенно при повышенной частоте, необходимо иметь в виду, что емкость его может заметно изменяться при повышении частоты обычно в сторону снижения. Основной причиной уменьшения емкости конденсатора с увеличением частоты является снижение диэлектрической проницаемости диэлектрика при повышенных частотах. В общем случае диэлектрическую проницаемость можно рассматривать как сумму четырех составляющих, соответствующих основным типам поляризации, которые могут существовать в диэлектрике:

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_d + \varepsilon_i' + \varepsilon_i'', \qquad (33)$$

ε_e — обусловлена электронной поляризацией, ε_d — дипольной поляризацией, ε_i' — ионной поляризацией за счет связанных ионов и ε_i'' — ионной поляризацией за счет полусвободных ионов. Составляющие ε_e и ε_i', соответствующие полностью обратимым, мгновенно устанавливающимся типам поляризации (§ 6), не зависят от частоты (в пределах до $10^7 \ldots 10^8$ Hz); составляющие ε_d и ε_i'', соответствующие не полностью обратимым типам поляризации, требующим для установления известного времени, уменьшаются с частотой, так как при высоких частотах часть зарядов не успевает смещаться. Составляющая ε_i'' резко уменьшается уже при сравнительно низких частотах, порядка десятков или сотен герц. В соответствии с этим будет уменьшаться с частотой и общая диэлектрическая проницаемость ε, а следовательно уменьшится и емкость конденсатора.

Дополнительное резкое снижение емкости конденсатора с частотой может быть обусловлено наличием в нем по-

следовательно включенного сопротивления r, например сопротивления обкладок [13]. В этом случае эффективная емкость при частоте ω может быть подсчитана по формуле:

$$C_e = \frac{C}{1 + r^2\omega^2C^2}, \qquad (34)$$

где

C — емкость при низкой частоте в F,
C_e — емкость при высокой частоте в F,
r — последовательно включенное сопротивление в Ω.

Наличие индуктивности L в конденсаторе дает увеличение эффективной емкости с частотой, так как величина эффективной емкости оценивается по силе тока, потребляемой конденсатором, а последняя будет расти за счет компенсации реактивного емкостного сопротивления — индуктивным сопротивлениям [14].

В этом случае эффективная емкость будет равна:

$$C_e = \frac{C}{1 - \omega LC}, \qquad (35)$$

где C_e и C — в F и L — в H.

Зависимость емкости от частоты, обусловленная индуктивностью и последовательно включенным активным сопротивлением, проявляется обычно только при высоких частотах, превышающих $10^5...10^6$ Hz. При низкой частоте влияние последовательного сопротивления на величину емкости можно наблюдать только у электролитических конденсаторов, у которых это сопротивление (сопротивление электролита, включенное последовательно с емкостью оксидного слоя) относительно велико.

§ 14. Потери энергии в конденсаторе

Всякий реальный конденсатор, включенный в электрическую цепь, рассеивает энергию, т. е. обладает активным сопротивлением. Эта энергия является потерянной, так как расходуется на вредный нагрев конденсатора или уходит в окружающую среду. Потери энергии в конденсаторе в общем случае складываются из следующих составляющих:

1) Потери в диэлектрике конденсатора P_D:
   а) от движения ионов (проводимость и поляризация),
   б) от вращения дипольных молекул,
   в) от ионизации воздушных включений в диэлектрике,
   г) от ионизации воздуха у краев обкладок.

2) Потери в металлических частях конденсатора P_M:

а) от джоулева эффекта в обкладках,

б) от джоулева эффекта в контактах и выводах,

в) от вибрации обкладок.

Полные потери энергии в конденсаторе в единицу времени (активная мощность):

$$P_A = P_D + P_M. \tag{36}$$

Для уменьшения потерь энергии в конденсаторе, что особенно важно для конденсаторов, применяемых при высоких частотах, необходимо проводить следующие основные мероприятия:

1) Выбирать диэлектрик с малым углом потерь (это относится как к основному диэлектрику, разделяющему обкладки, так и к вспомогательным: заливочной массе, изоляции выводов, материалу неметаллических корпусов и т. д.).

2) Тщательно освобождать конденсатор от остатков воздуха.

3) Уменьшать сопротивление обкладок, выбирая материал с меньшим удельным сопротивлением (см. табл. 1) или увеличивая сечение обкладок.

Таблица 1

Некоторые свойства материалов, применяемых в конденсаторостроении для изготовления обкладок

Название материала	Удельное сопротивление $\mu\Omega$ cm	Температурный коэфициент сопротивления на 1°C	Плотность g/cm^3	Температура плавления °C	Коэфициент линейного расширения $\times 10^8$ на 1°C (0...100°C)	Теплоемкость kcal (0...100°C)	Теплопроводность $\frac{W}{grad \cdot cm}$
Серебро	1,50	0,00400	10,5	960	19,7	0,056	4,20
Медь	1,75	0,00445	8,9	1083	16,5	0,100	3,93
Золото	2,20	0,00377	19,2	1063	—	—	3,10
Алюминий	2,80	0,00423	2,7	658	23,8	0,168	2,22
Бронза	5	—	8,8	900	16,0	0,087	—
Латунь	6,5	—	8,6	900	19,0	0,092	—
Олово	13,1	0,00440	7,4	232	26,7	0,559	0,63
Свинец	20,5	0,00411	11,3	327	28,5	0,031	0,34
Цинк	6	0,00390	7,1	419	17,1	0,100	1,10

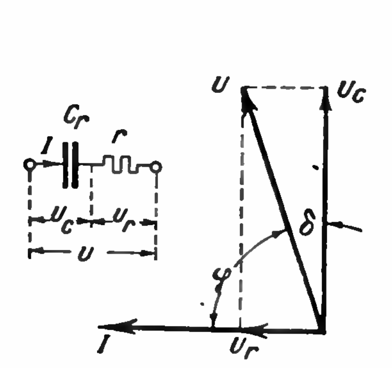
4) Сильно стягивать конденсаторные секции во избежание вибрации обкладок.

5) Правильно рассчитывать сечение контактов и выводов и обеспечивать малое переходное сопротивление в месте присоединения выводов к обкладкам.

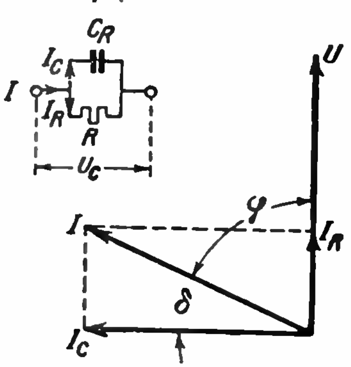
При оценке потерь в металлических частях конденсатора надо иметь в виду, что сопротивление обкладок часто может быть значительным. Это вызывается применением в качестве обкладок тонкой фольги (толщина 5...7 микрон) или тонких слоев металла, нанесенных непосредственно на поверхность диэлектрика химическим путем, механическим распылением, испарением в вакууме и т. д. (толщина до 2...3 микрон и меньше). Особенно велико сопротивление обкладок в электролитических конденсаторах, в которых роль одной из обкладок играет электролит, имеющий удельное сопротивление $10^2...10^8\ \Omega\cdot$cm.

§ 15. Угол потерь конденсатора

В идеальном конденсаторе активная мощность: $P_A = UI\cos\varphi = 0$, так как $\varphi = 90°$. В реальном конденсаторе $P_A \neq 0$ и, следовательно, $\varphi \neq 90°$ или $\varphi + \delta = 90°$.



Фиг. 10. Последовательная схема, эквивалентная конденсатору с потерями



Фиг. 11. Параллельная схема, эквивалентная конденсатору с потерями

Угол δ, дополняющий до 90° угол сдвига между векторами тока и напряжения, в реальном конденсаторе носит название „угла потерь".

Конденсатор с потерями, обладающий активным сопротивлением, можно заменить эквивалентной схемой: последовательной (фиг. 10) или параллельной (фиг. 11).

Для последовательной схемы:

$$\mathrm{tg}\,\delta = \frac{U_r}{U_C} = \frac{I\cdot r}{I/\omega C_r} = r\cdot\omega C_r. \tag{37}$$

Для параллельной схемы:

$$\mathrm{tg}\,\delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{U/R}{U\omega C_R} = \frac{1}{R\omega C_R}. \tag{38}$$

В формулах (37—38) величины r и R представляют собой значения сопротивления, эквивалентного потерям в конденсаторе, выраженные в Ω; C_r и C_R выражены в F.

Связь между параметрами последовательной и параллельной схем устанавливается формулами:

$$C_R = \frac{C_r}{1 + \mathrm{tg}^2\delta}, \tag{39}$$

$$R = r\left(1 + \frac{1}{\mathrm{tg}^2\delta}\right). \tag{40}$$

Зная величину $\mathrm{tg}\delta$ конденсатора, легко вычислить активную мощность, потребляемую последним:

$$P_A = UI\cos\varphi \approx U^2\omega C\,\mathrm{tg}\delta, \tag{41}$$

где P_A — в W, U — в V и C — в F.

Иногда для оценки качества конденсаторов, вместо величины $\mathrm{tg}\delta$, применяют коэфициент мощности $\cos\varphi$, обычно выражаемый в процентах. При малых значениях угла δ $\mathrm{tg}\delta \approx \cos\varphi$. При больших значениях δ надо производить пересчет по тригонометрической формуле:

$$\mathrm{tg}\delta = \frac{\cos\varphi}{\sqrt{1 - \cos^2\varphi}}. \tag{42}$$

Реже качество конденсатора оценивается величиной удельных потерь, выражаемых в % или в $\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{kVAR}}$.

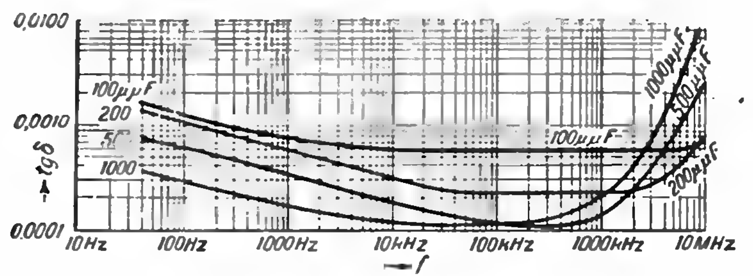
$$p_{уд} = \frac{P_A}{P_R}. \tag{43}$$

Поскольку реактивная мощность P_R мало отличается от кажущейся мощности P (§ 13), можно полагать $p_{уд} \approx \cos\varphi$. Угол потерь конденсатора резко увеличивается, если влага проникает в толщу диэлектрика и увеличивает объемную проводимость последнего. Увеличение поверхностной проводимости, обусловленное влагой, осевшей на поверхности выводных изоляторов или на свободных закраинах конденсатора, также может приводить к заметному увеличению угла потерь (фиг. 65). При длительном воздействии влажности может наблюдаться добавочное возрастание $\mathrm{tg}\delta$, обусловленное коррозией в контактах, увеличивающей переходное сопротивление.

Повышение температуры в конечном счете всегда дает увеличение $\mathrm{tg}\delta$ конденсатора, обусловленное возрастанием проводимости диэлектрика. Вместе с тем в известном интервале температур иногда может наблюдаться максимум

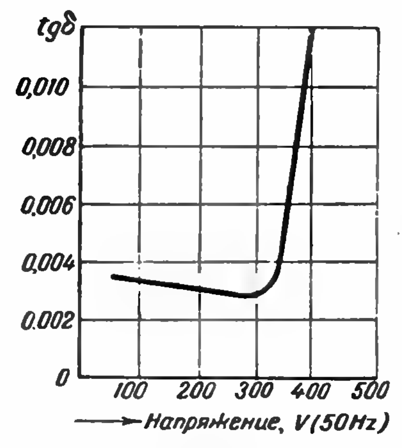
tgδ, обусловленный наличием в диэлектрике дипольных молекул.

При повышении частоты составляющая угла потерь кон-



Фиг. 12. Зависимость угла потерь слюдяных конденсаторов от частоты (Синклер)

денсатора, обусловленная потерями в диэлектрике, уменьшается, так как угол потерь диэлектриков падает с частотой. (В известном интервале частот может наблюдаться дипольный максимум tgδ.)



Фиг. 13. Зависимость угла потерь бумажного конденсатора от напряжения (бумага 2×11 μ; пропитка парафином) (Ренне)

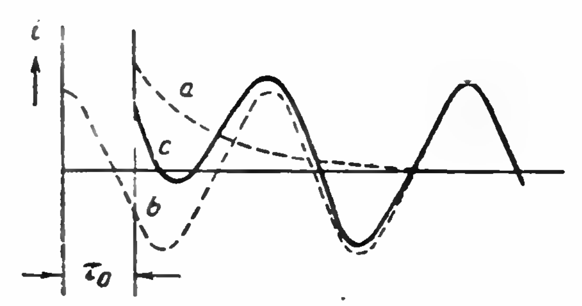
В то же время составляющая, обусловленная потерями в металлических частях, увеличивается с частотой. В результате зависимость tgδ конденсатора от частоты в общем виде должна иметь U-образную форму (фиг. 12).

При наличии в конденсаторе остатков воздуха повышение напряжения, начиная с некоторого критического значения U_0 (ионизирующее напряжение или напряжение „короны"), вызывает резкое возрастание угла потерь конденсатора, обусловленное ионизацией воздушных включений в диэлектрике или ионизацией воздуха у краев обкладок (фиг. 13).

§ 16. Заряд конденсатора переменным напряжением

При включении конденсатора в цепь переменного тока, даже при отсутствии индуктивности, процесс заряда протекает значительно сложнее, чем при постоянном токе. Изменения напряжения на зажимах конденсатора и изме-

нения силы тока в этом случае обусловлены наложением друг на друга двух процессов: неустановившегося режима, исчезающего вскоре после включения конденсатора в цепь, и установившегося режима, сохраняющегося до выключения конденсатора из цепи (фиг. 14).



Фиг. 14. Кривая тока при заряде конденсатора переменным напряжением в цепи, не имеющей индуктивности.
a—неустановившийся режим; *b*—установившийся режим; *c*—результирующая кривая тока

Наибольшее значение силы тока, в зависимости от момента включения, τ_0 может достигать величины:

$$I = \frac{U}{r},$$

где U — эффективное значение напряжения сети в V и r — активное сопротивление зарядной цепи в Ω.

Наибольшее значение напряжения на зажимах конденсатора при наличии в цепи индуктивности может достигать двойного амплитудного значения напряжения сети. Это необходимо учитывать при выборе конденсатора для применения в цепи переменного тока. Так при эффективном значении напряжения сети, равном 220 V, максимальное значение напряжения на конденсаторе при его включении может достигнуть величины:

$$2U_{max} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot 220 = 620\,\text{V}.$$

Для уменьшения толчка тока и ослабления перенапряжения при включении сильноточные конденсаторы большой мощности иногда снабжают пусковыми реостатами [34]. Наряду с этим конденсаторы с высоким рабочим напряжением снабжают параллельно приключаемыми разрядными сопротивлениями, так как при отсутствии этих сопротивлений, после разряда конденсатора кратковременным замыканием его обкладок накоротко, на них с течением времени может появиться остаточный заряд, опасный для обслуживающего персонала [152].

3 Ренне 5682

Кривая напряжения в сети переменного тока считается синусоидальной, если ни одна из ее ординат не отличается от соответствующей ординаты чистой синусоиды более, чем на 5% амплитудного значения последней.

Фактически кривая напряжения может и более заметно отличаться от чистой синусоиды. Такую кривую можно представить как сумму синусоидальных кривых (высших гармоник), имеющих различную частоту.

$$U = \Sigma (U_m)_n \cdot \sin(n\omega\tau + \beta_n), \tag{44}$$

где β_n — угол, определяющий положение вектора U_{mn}.

Эффективное значение силы тока для $n^{ой}$ гармоники:

$$I_n = \frac{U_n}{Z_n} = \frac{U_{mn}}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{r^2 + \left(n\omega L - \frac{1}{n\omega C}\right)^2}}, \tag{44a}$$

где I_n — в A, U_{mn} — в V, r — в Ω, L — в H и C — в F.

Суммарное значение силы тока будет равно:

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_3^2 + I_5^2 + \ldots I_n^2}, \tag{44б}$$

(Четные гармоники отсутствуют вследствие симметрии кривой напряжения.)

При наличии емкости сила тока высших гармоник увеличивается, так как уменьшается полное сопротивление, оказываемое сетью этим гармоникам (см. ф-лу 44а).

Поэтому, если кривая напряжения сильно несинусоидальна, то включение конденсаторов для улучшения $\cos\varphi$ может дать обратное действие, т. е. не уменьшить, а увеличить реактивный ток [15].

Для самого конденсатора высшие гармоники опасны тем, что увеличивают потери как в обкладках за счет увеличения суммарного тока, так и в диэлектрике за счет наложения повышенной частоты.

§ 17. Электрическая прочность конденсатора

Электрическая прочность конденсатора, т. е. его способность выдерживать, не пробиваясь, приложенное к его выводам напряжение, зависит прежде всего от толщины и от качества диэлектрика, разделяющего его обкладки.

Кроме того она может зависеть от особенностей конструкции: площади обкладок, условий теплопередачи и т. д.

Для оценки электрической прочности применяют следующие значения напряжения:

$U_{раб}$ — рабочее напряжение, при котором конденсатор может надежно работать длительный промежуток вре-

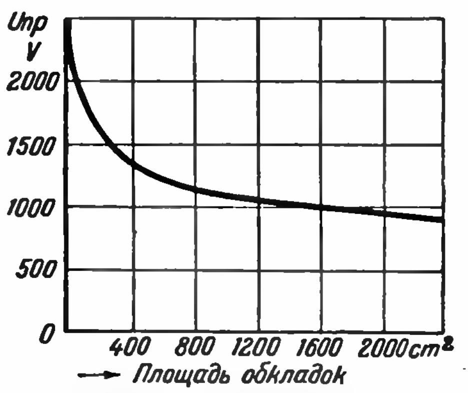
мени (обычно гарантируется срок службы не менее 10 000 часов при непрерывной работе).

$U_{ис}$ — испытательное напряжение, которое конденсатор должен выдерживать, не пробиваясь, в течение определенного небольшого промежутка времени (обычно 1 минута, иногда 5 секунд).

$U_{проб}$ — пробивное напряжение, которое выводит конденсатор из строя при быстром испытании (обычно при определении пробивного напряжения конденсатор доводится до пробоя в течение нескольких секунд).

Конденсаторы с органическим диэлектриком резко снижают электрическую прочность при длительном действии напряжения (явление „старения"). Для таких конденсаторов $U_{раб}$ берут в несколько раз ниже $U_{проб}$, а $U_{ис}$ — в несколько раз выше $U_{раб}$. Для конденсаторов с твердым неорганическим или с газообразным диэлектриком значения $U_{раб}$, $U_{ис}$ и $U_{проб}$ — сближаются.

Если в конденсаторе может иметь место тепловой пробой, то большое значение приобретает отвод тепла. Рациональная конструкция, обеспечивающая хорошую теплоотдачу, позволяет в этом случае заметно повысить рабочее напряжение конденсатора. Величина площади обкладок имеет большое значение для низковольтных конденсаторов, в которых слой диэлектрика тонок и содержит значительное количество „слабых мест".



Фиг. 15. Зависимость пробивного напряжения бумажного конденсатора от площади обкладок (бумага 2×8 μ; пропитка галоваксом) (Ренне)

Увеличение площади обкладок в таких конденсаторах приводит к увеличению количества слабых мест между обкладками, увеличивает вероятность пробоя и снижает $U_{проб}$ (фиг. 15). Поэтому конденсаторы большой емкости выгоднее изготовлять путем параллельного соединения секций меньшей емкости, с меньшей площадью обкладок. Для повышения электрической прочности низковольтных конденсаторов применяют диэлектрик, составленный из нескольких тонких слоев.

В этом случае за счет несовпадения слабых мест в разных слоях влияние слабых мест резко ослабляется.

Пробой конденсатора может произойти не только через толщу диэлектрика, но и по поверхности закраин („перекрытие“). Поэтому надо правильно выбирать расстояние от края обкладки до края диэлектрика (ширину закраин), особенно в случае конденсаторов высокого напряжения, применяемых в цепи постоянного тока. Для конденсаторов переменного тока опасность „перекрытия“ предотвращается путем сборки конденсатора из нужного числа последовательно соединяемых секций (при переменном токе напряжение распределяется между секциями в соответствии с их емкостями; легкость получения нужной точности емкости отдельных секций позволяет добиться хорошей однородности распределения напряжения между ними).

Электрическая прочность конденсаторов обычно снижается при повышении температуры окружающей среды, так как, с одной стороны, при этом ухудшается отвод тепла от конденсатора, а с другой — усиливается тепловыделение в нем за счет возрастания потерь с температурой.

Также опасно повышение частоты, приводящее к увеличению потерь в обкладках и диэлектрике конденсатора, а также к усилению интенсивности ионизации воздушных включений. В соответствии с этим при повышении температуры окружающей среды сверх нормированного значения или при переходе на повышенную частоту рабочее напряжение конденсатора должно быть снижено.

Качество диэлектрика сильно зависит от технологии изготовления конденсатора (в случае бумажных конденсаторов от процессов сушки и пропитки, в случае керамических — от процесса обжига, в случае электролитиков — от процесса формовки анодов и т. д.); поэтому для получения высокой и однородной электрической прочности необходимо уделять большое внимание разработке правильного технологического процесса и строго вести этот процесс по разработанным инструкциям, не допуская отклонений.

Такое же значение имеет тщательно поставленный контроль качества сырых материалов, применяемых в производстве конденсаторов.

Глава II

КОНДЕНСАТОРЫ С ГАЗООБРАЗНЫМ И ЖИДКИМ ДИЭЛЕКТРИКОМ

§ 18. Общая характеристика конденсаторов с газообразным диэлектриком

Основным недостатком конденсаторов данного типа является низкое значение их удельной емкости на единицу объема. Этим обусловливаются большой габарит и большой

вес конденсаторов при сколько-нибудь значительной величине их номинальной емкости и при повышенных рабочих напряжениях. Этот недостаток обусловлен малой величиной диэлектрической проницаемости всякого газа ($\varepsilon \approx 1$) и низкой его электрической прочностью при нормальном давлении $\left(\text{для воздуха } E_{пр} = 1{,}5...3 \frac{kV}{mm}\right)$. Кроме того, даже если конденсатор данного типа предназначен для работы при небольших напряжениях, расстояние между обкладками не может быть взято очень малым; получение зазора между пластинами меньше 0,5 mm уже представляет очень сложную конструктивную задачу.

Заметное улучшение электрической прочности газов может быть достигнуто повышением давления (для воздуха при давлении 20 атмосфер $E_{пр} = 50 \frac{kV}{mm}$). Высокую электрическую прочность можно получить также при хорошем вакууме $\left(E_{пр} = 60 \dots 100 \frac{kV}{mm}\right)$. Это объясняется ионизационной природой пробоя газов [5]. Использование зависимости электрической прочности газов от давления позволяет получить заметный выигрыш в габарите конденсаторов с газообразным диэлектриком при высоких рабочих напряжениях. Преимуществом конденсаторов этого типа является также их способность полностью восстанавливать свою электрическую прочность после пробоя. Практическая независимость диэлектрической проницаемости газов от температуры и частоты, высокое их удельное сопротивление и ничтожно малый угол потерь (при напряжениях ниже ионизирующего значения напряжения) дают возможность изготовлять конденсаторы с диэлектриком этого типа, обладающие высокими электрическими свойствами и большой стабильностью емкости. Большим преимуществом конденсаторов с газообразным диэлектриком является также конструктивная легкость осуществления плавного изменения емкости.

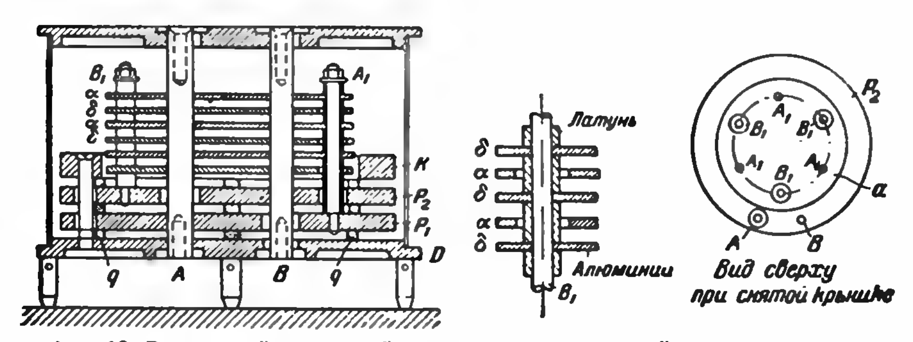
Все эти преимущества не искупают полностью основного недостатка — малой удельной емкости: например, воздушный конденсатор с рабочим напряжением 500 V при емкости 0,1 μF имеет объем около 0,1 m^3 и вес более 30 kG. Поэтому во всех случаях, когда требуется сколько-нибудь значительная емкость, конденсаторы с газообразным диэлектриком оказываются непригодными. Их целесообразно применять только в следующих основных случаях:

Когда требуются очень малая емкость, плавное изменение емкости или очень малый угол потерь.

Емкость воздушных конденсаторов обычно не превышает 0,001...0,01 μF и лишь в исключительных случаях (эталоны емкости) достигает значения 0,1...0,2 μF.

§ 19. Воздушные конденсаторы постоянной емкости

Эталонные воздушные конденсаторы низкого напряжения рассчитываются на рабочее напряжение до 500 V постоянного тока и имеют номинальную емкость в пределах от 10 μμF до 0,01...0,1 μF. От этих конденсаторов требуются: высокая точность значения емкости, высокая стабильность емкости во времени, малый температурный коэфициент ем-



Фиг. 16. Воздушный эталонный конденсатор постоянной емкости низкого напряжения.

D—основание конденсатора (дно); P_1 и P_2—основные пластины; α и δ—дополнительные пластины; *q*—кварцевые прокладки (твердый диэлектрик); *A* и *B*—контактные стержни; A_1 и B_1—крепящие стержни; *K*—стягивающее кольцо

кости, малая зависимость емкости от частоты, высокое сопротивление изоляции и малый $tg\delta$.

Конденсаторы этого типа обычно изготовляют в виде системы плоских пластин, реже в виде системы концентрических цилиндров. Во втором случае стабильность хуже и больше габарит.

Типичная конструкция эталонного конденсатора с номинальной емкостью 100...1000 μμF приведена на фиг. 16 [37].

Подгонку емкости производят изменением числа пластин или изменением зазора у одной-двух пар пластин. Для окончательной подгонки изменяют площадь верхней пластины при помощи „крылатки“, небольшого металлического сектора, прикрывающего секторный вырез в верхней пластине.

Обозначим емкость между системами пластин 1 и 2 через C_{12}, емкость системы 1 на корпус — через C_{10} и емкость системы 2 на корпус — через C_{20}. Тогда между выводами конденсатора можно измерить три значения емкости:

1) пластины не соединены с корпусом: $C' = C_{12} + \frac{C_{20} \cdot C_{10}}{C_{20} + C_{10}}$,

2) система 1 соединена с корпусом $C'' = C_{12} + C_{20}$,

3) система 2 соединена с корпусом $C''' = C_{12} + C_{10}$.

Рабочим значением емкости считают C''; для него и ведут подгонку емкости к номинальному значению.

По данным фирмы Ульрих точность подгонки емкости составляет: $\pm 0{,}2\,\mu\mu F$ при емкости до $200\,\mu\mu F$ и $\pm 0{,}10\%$ при емкости выше $200\,\mu\mu F$. Изменение емкости во времени для емкостей менее $1000\,\mu\mu F$ не превышает $0{,}1\,\mu\mu F$; для больших емкостей в первые годы наблюдается увеличение емкости порядка 0,2...0,3%, а в дальнейшем происходят колебания емкости в пределах $\pm 0{,}02\%$. При изменении частоты от 1500 Hz до 300 kHz изменение емкости не превышает 0,01...0,02%; температурный коэфициент емкости $\alpha_t = 0{,}002...0{,}003\%$ на 1°C; индуктивность $L = 0{,}02...0{,}04\,\mu H$; сопротивление изоляции $10^7 M\Omega$; $tg\delta = 5...10 \cdot 10^{-6}$ [37].

Эталонные конденсаторы этого типа изготовляются несколькими заграничными фирмами (например фирмами Ульрих и Зелингер). Отдельные образцы эталонных конденсаторов изготовлялись и в СССР [38].

Эталонные воздушные конденсаторы высокого напряжения рассчитываются на рабочее напряжение от 10...20 до 100...300 kV (частота 50 Hz) при номинальной емкости 25...250 $\mu\mu F$.

Конденсаторы должны иметь высокую стабильность емкости и малый угол потерь; при рабочем напряжении воздух в конденсаторе не должен ионизироваться; форма конденсатора должна позволять вычисление его емкости с достаточной точностью. Обычно конденсатор состоит из двух концентрических цилиндров, расположенных горизонтально или вертикально; последнее выгоднее, так как требуется меньшая площадь пола.

В конструкции конденсатора должны быть предусмотрены „охранные кольца", обеспечивающие равномерность распределения электрического поля в рабочем пространстве и упрощающие вычисление емкости. Кроме того эти кольца экранируют внутренний электрод и уменьшают угол потерь.

Три варианта конструкции конденсаторов данного типа приведены на фиг. 17 [39—41]. При конструировании конденсаторов принимают напряженность поля у внутренней поверхности $E = 1{,}4...1{,}5 \frac{kV_{max}}{mm}$, а отношение диаметров наружного и внутреннего цилиндров берут равным: $\frac{D}{d} = 2{,}2...2{,}7$.

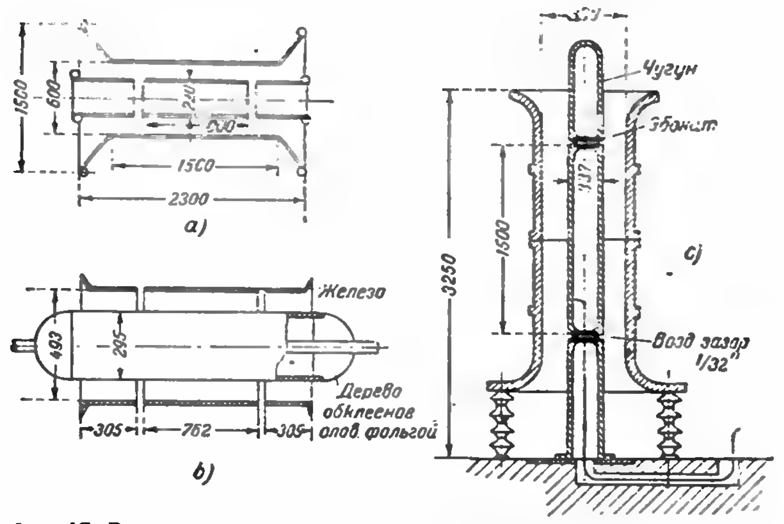
Для того чтобы получить значение емкости, мало отличающееся от расчетного, необходимо производить обработку рабочих поверхностей цилиндров с большой точностью и устанавливать цилиндры строго коаксиально. Увеличение емкости высоковольтных эталонных конденсаторов при повышении напряжения от $U_{раб}$ до $U_{проб}$ не превышает 0,0015%; повышение влажности от 40 до 80%

вызывает увеличение емкости на 0,015...0,020%; температурный коэфициент емкости $\alpha_t = 0{,}002\%$ на 1°C; $\mathrm{tg}\,\delta = 1\cdot10^{-4}$. При наличии пыли на рабочих поверхностях угол потерь может заметно возрасти при повышении влажности (до $1\cdot10^{-3}$ и выше) [41]. Пробивное напряжение конденсаторов этого типа:

$$U'_{пр} = (1{,}1...1{,}5)\,U_{раб.}$$

Высоковольтные воздушные конденсаторы очень громоздки и неудобны, а потому в последние годы заменяются газонаполненными конденсаторами.

Воздушные конденсаторы постоянной емкости, применяемые в контурах радиопередатчиков, при длинах волн ниже



Фиг. 17. Воздушные эталонные конденсаторы высокого напряжения.
a) конденсатор Семма: 100 kV; 55,6 μμF; *b*) конденсатор Уайтхеда и Исхмки: 200 kV; 82,6 μμF; *c*) конденсатор Черчера и Данната: 150 kV; 100 μμF

100 m ($f > 3\cdot10^6$ Hz) рассчитываются на рабочее напряжение от 1...2 до 10...20 kV при номинальной емкости до 0,001...0,010 μF. В отличие от эталонных конденсаторов они могут иметь небольшую точность емкости (допуск ±10...15%), но стабильность емкости их должна быть достаточно высокой для обеспечения постоянства частоты передатчика; угол потерь должен быть мал, чтобы не увеличивать затухания в контуре.

Обычная конструктивная форма конденсатора — система плоских пластин. Пластины крепят на стержнях с помощью разделительных втулок, так же как в низковольтных эталонных конденсаторах. Крепящие стержни пластин одного знака пропускают через круглые вырезы в пластинах дру-

гого знака или проводят мимо срезанных углов этих пластин. Сами крепящие стержни обычно закрепляют с помощью гаек на плате из электроизолирующего материала. Пластины изготовляют из латуни, алюминия или из алюминиевых сплавов. Стандартные размеры пластин: квадраты со стороной 45, 55, 100 или 200 mm или круги с такими же значениями диаметра. Толщина пластин 0,5...3 mm. Края пластин должны быть закруглены, а поверхности тщательно отполированы для уменьшения потерь на ионизацию. Расстояние между пластинами выбирается в соответствии с рабочим напряжением, причем рабочая напряженность поля принимается равной 0,65...0,75 $\frac{kV}{mm}$, а испытательная 1 $\frac{kV}{mm}$.

В качестве твердого диэлектрика для изготовления изоляционной платы конденсатора раньше применяли гетинакс, эбонит и микалекс. В современных конструкциях для этой цели применяют высокочастотную керамику, обеспечивающую малый угол потерь конденсатора и высокое постоянство зазора между пластинами (см. § 40).

В последнее время воздушные контурные конденсаторы вытесняются более компактными газонаполненными, а при коротких волнах — вакуумными конденсаторами.

§ 20. Воздушные конденсаторы переменной емкости

Плавно изменяющуюся емкость с максимальным значением до нескольких тысяч μμF удобнее всего осуществить в виде переменного воздушного конденсатора.

Изменение емкости может быть достигнуто или изменением площади перекрытия обкладок S или изменением зазора между обкладками d. В плоском конденсаторе изменение S достигается вращательным движением пластин одной системы относительно другой, а изменение d — поступательным движением; в цилиндрическом конденсаторе изменение S достигается поступательным движением внутреннего цилиндра по отношению к внешнему, а изменение d — вращательным движением, причем в последнем случае оси цилиндров не должны совпадать.

Наиболее распространенный тип воздушного конденсатора переменной емкости — плоский с вращательным движением пластин. Существует ряд модификаций этого типа, отличающихся друг от друга различным очертанием подвижных пластин и различным характером зависимости емкости от угла поворота. Эти модификации имеют следующие названия:

1) прямоемкостный конденсатор (прямолинейный): обычный и диференциальный,

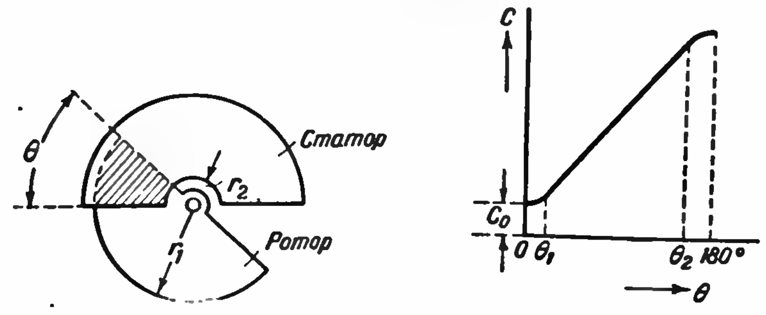
2) прямоволновый конденсатор (квадратичный),

3) прямочастотный конденсатор,

4) логарифмический конденсатор (среднелинейный).

Наибольшее применение имеют прямоемкостные и логарифмические конденсаторы.

Прямоемкостный конденсатор имеет полукруглую форму пластин статора (неподвижная система пластин) и ротора (подвижная система). Такая форма дает линейный характер зависимости емкости от угла поворота $C=f(\theta)$; отклонения от линейности при $\theta=0$ и $\theta=180^\circ$ объясняются искажением электрического поля у краев пластин конденсатора (фиг. 18). При $\theta=0$ имеем $C=C_0$. Это значение емкости (начальная



Фиг. 18. Прямоемкостный переменный конденсатор

емкость) обусловлено емкостью между торцами пластин статора и ротора. Для прямолинейного участка кривой (от θ_1 до θ_2) имеем:

$$C=a\theta+b, \tag{45}$$

где $a=\frac{C_2-C_1}{\theta_2-\theta_1}$ и $b=\frac{C_1\theta_2-C_2\theta_1}{\theta_2-\theta_1}$.

Пренебрегая отклонением от прямолинейности, имеем для всей кривой: $C=f(\theta)$; $a=\frac{dC}{d\theta}$ и $b=C_0$.

Максимальное значение площади перекрытия пластин:

$$S_{max}=\frac{\pi}{2}(r_1^2-r_2^2), \tag{46}$$

где r_1 — радиус пластины ротора, а r_2 — радиус выреза в пластине статора для прохода оси ротора.

Максимальное значение емкости конденсатора:

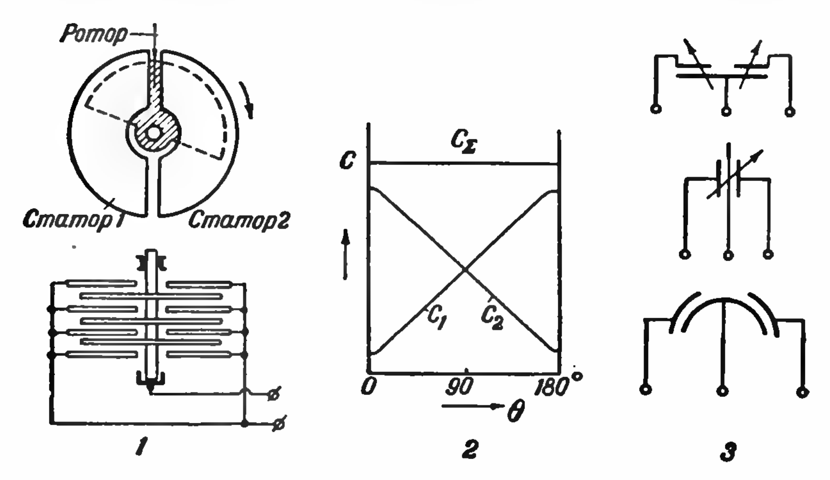
$$C_{max}=\frac{S_{max}(n-1)}{4\pi d}=\frac{(r_1^2-r_2^2)(n-1)}{8d}, \tag{47}$$

где C_{max} и все размеры выражены в cm.

При расчете конденсатора по заданному значению $U_{раб}$ выбирают зазор d; затем по выбранному d и заданному значению C_{max} подбирают число пластин n и радиус ротора r_1, задавшись определенной величиной радиуса выреза r_2 [42].

Прямоемкостные конденсаторы широко применяют в измерительной технике вследствие удобства их градуировки.

Диференциальный конденсатор представляет собой сдвоенный прямоемкостный конденсатор с двумя статорами и одним общим ротором (фиг. 19). В таком конденсаторе



Фиг. 19. Диференциальный конденсатор.
1—схема устройства; 2—зависимость емкости от угла поворота; 3—условные обозначения

существуют две составляющие емкости C_1 и C_2 и суммарная емкость $C_Σ = C_1 + C_2$. При увеличении одной из емкостей C_1 или C_2 вторая соответственно уменьшается, а суммарная емкость $C_Σ$ остается постоянной при всех значениях угла поворота. Такие конденсаторы оказываются весьма удобными в ряде случаев измерительной техники (например для применения в качестве двух плеч емкостного моста) и в радиотехнике (связь с антенной, тонрегулятор и т. п.).

В электрических схемах диференциальный конденсатор обозначается одним из символов, показанных в правой части фиг. 19.

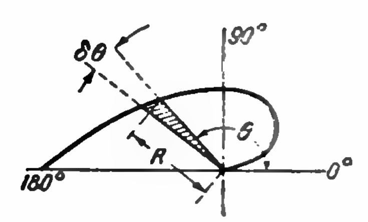
Прямоволновый конденсатор имеет такую форму пластин, которая обеспечивает линейный характер зависимости длины волны λ (того контура, в который включен конденсатор) от угла поворота конденсатора θ. Такой характер этой зависимости удобнее для настройки контуров на определенную длину волны, чем криволинейный характер зависимости

$\lambda = f(\theta)$, который получается при использовании прямоемкостного конденсатора.

Длина волны пропорциональна корню квадратному из емкости:

$$\lambda = 2\pi\sqrt{LC} = K_1\sqrt{C}\cdot \qquad (48)$$

Поэтому для получения линейной зависимости $\lambda = f(\theta)$ надо выбрать такую форму пластин ротора, которая обеспечивала бы пропорциональность емкости конденсатора квадрату угла поворота.



Фиг. 20. Определение формы пластины ротора для прямоволнового конденсатора

Для этого необходимо, чтобы величина площади перекрытия пластин S была бы пропорциональна квадрату угла поворота. Определение формы очертания пластин ротора, позволяющей получить определенную заданную зависимость площади перекрытия от угла поворота: $S = f(\theta)$, сводится к нахождению зависимости $R = f(\theta)$, где R—переменный радиус пластин ротора. Эту зависимость удобно находить в полярных координатах (фиг. 20).

Даем углу θ приращение $\delta\theta$ настолько малое, чтобы радиус R практически не изменился. Тогда приращение площади перекрытия будет представлять собой площадь кругового сектора:

$$\delta S = \frac{\delta\theta \cdot R^2}{2},$$

где $\delta\theta$ — выражено в радианах (1 радиан $= 57{,}3^\circ$). Выражая $\delta\theta$ в градусах, получим:

$$\delta S = \frac{\delta\theta \cdot R^2}{114{,}6}.$$

Решая это уравнение относительно R и взяв бесконечно малое приращение $d\theta$, получаем общее выражение в диференциальной форме:

$$R = \sqrt{114{,}6\frac{dS}{d\theta}}\,. \qquad (49)$$

Формула (49) показывает, что для нахождения уравнения кривой очертания пластин ротора нужно взять производную от площади перекрытия пластин по углу поворота.

Пользуясь этим методом, можно найти уравнение формы пластин ротора для прямоволнового конденсатора [42, 43];

$$R = \sqrt{229{,}2ka\,(a\theta + b) + 114{,}6k'}\,. \qquad (50)$$

Входящие в это уравнение постоянные коэфициенты имеют следующие значения:

$$a = \frac{\sqrt{C_{max}} - \sqrt{C_0}}{\theta_{max}}; \quad b = \sqrt{C_0}; \quad k = \frac{S_{max} - k'\theta_{max}}{C_{max} - C_0};$$

$$k' = \frac{r_2^2}{114{,}6},$$

где

C_0 — начальная емкость конденсатора в cm,
C_{max} — максимальная " "
θ_{max} — максимальный угол поворота в градусах,
S_{max} — максимальная площадь перекрытия в cm²,
r_2 — радиус выреза в пластинах статора в cm.

Значение S_{max} можно найти из формулы (47) после того, как будут выбраны значения зазора d и числа пластин n.

Сводка основных формул для разных типов плоских переменных воздушных конденсаторов с вращательным движением пластин приведена в табл. 2.

Прямочастотный конденсатор обеспечивает линейную зависимость между частотой f контура и углом поворота конденсатора. Такая зависимость удобна при настройке контуров на определенную частоту (а не на длину волны).

Частота контура обратно пропорциональна корню квадратному из емкости конденсатора:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{k_2}{\sqrt{C}}. \tag{51}$$

Поэтому для того, чтобы обеспечить линейность зависимости $f = f(\theta)$, необходимо, чтобы емкость конденсатора была бы обратно пропорциональна квадрату угла поворота. Основные формулы для прямочастотного конденсатора приведены в табл. 2.

При выводе этих формул надо иметь в виду, что при увеличении угла поворота, соответствующем увеличению частоты контура, емкость конденсатора должна уменьшаться; иными словами, вращение ручки этого конденсатора должно быть обратным по сравнению с остальными типами переменных конденсаторов.

Логарифмический конденсатор отличается тем, что в нем относительное изменение емкости на единицу угла поворота сохраняет постоянное значение по всей длине его шкалы:

$\left.\frac{\delta C}{C}\right| \delta\theta = \text{const} = b$, откуда: $\frac{\delta C}{C} = b\delta\theta$ или в диференциальной форме: $\frac{dC}{C} = bd\theta$; интегрируя, получаем: $\ln C = a' + b\theta$

Таблица 2

Основные формулы для плоских переменных конденсаторов с вращательным движением пластин

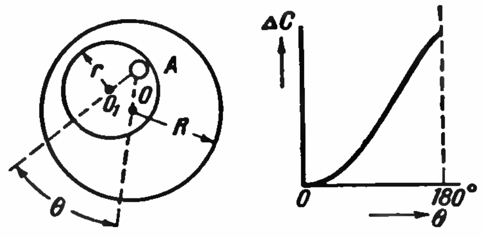
Тип конденсатора	Прямоемкостный	Прямоволновый	Прямочастотный	Логарифмический
$C=f(\theta)$	$C=a\theta+b$	$C=(a\theta+b)^2$	$C=\frac{1}{(a\theta+b)^2}$	$C=ae^{b\theta}$
a	$\frac{C_{max}-C_0}{\theta_{max}}$	$\frac{\sqrt{C_{max}}-\sqrt{C_0}}{\theta_{max}}$	$\frac{1}{\theta_{max}}\cdot\left(\frac{1}{\sqrt{C_0}}-\frac{1}{\sqrt{C_{max}}}\right)$	C_0
b	C_0	$\sqrt{C_0}$	$\frac{1}{\sqrt{C_{max}}}$	$\frac{\lg C_{max}-\lg C_0}{0{,}435\theta_{max}}$
S_{max}	$\frac{\pi}{2}(R^2-r^2)$	$S_{max}=k[C_{max}-C_0]+k'\theta_{max}$		
k и k'	—	$k=\frac{S_{max}-k'\theta_{max}}{C_{max}-C_0}$ и $k'=\frac{r^2}{114{,}6}$		
$R=f(\theta)$	const	$10{,}7\sqrt{2ka(a\theta+b)+k'}$	$10{,}7\sqrt{\frac{2ka}{(a\theta+b)^3}+k'}$	$10{,}7\sqrt{kabe^{b\theta}+k'}$

или, обозначив $e^{a'}=a$

$$C=ae^{b\theta}. \tag{52}$$

Таким образом для этого конденсатора зависимость емкости от угла поворота имеет логарифмический характер. Основные формулы для логарифмического конденсатора также приведены в табл. 2. Применение логарифмических конденсаторов удобно при изготовлении блоков переменных конденсаторов (блок представляет собой несколько конденсаторов, у которых роторы имеют общую ось), так как в этом случае меньше сказывается неточность сборки, чем при любом другом типе конденсатора.

Кривая $C=f(\theta)$ для логарифмического конденсатора занимает среднее положение между аналогичными кривыми для прямоволнового и прямочастотного конденсаторов. Поэтому логарифмический конденсатор иногда называют среднелинейным.



Фиг. 21. Цилиндрический переменный конденсатор с вращательным движением

В плоском переменном конденсаторе с поступательным движением пластин площадь перекрытия S сохраняет постоянное значение и изменение емкости достигается изменением зазора d [44].

Для такого конденсатора:

$$C=\frac{S}{4\pi d}=\frac{k}{d} \text{ или } C\cdot d=k, \tag{53}$$

т. е. зависимость емкости от зазора носит гиперболический характер; при больших зазорах изменение емкости на единицу изменения зазора — мало, а при малых зазорах — велико.

Обычно используется пологая часть кривой $C=f(d)$ для получения малых изменений емкости. Конденсаторы этого типа обычно изготовляют для небольших значений емкости и имеют лишь одну пару пластин. При работе с такими конденсаторами надо иметь в виду, что при изменении емкости меняется и рабочее напряжение конденсатора в соответствии с изменением зазора.

В цилиндрическом конденсаторе с вращательным движением (фиг. 21) изменение емкости также достигается изменением зазора при постоянном значении площади перекрытия.

Вращение внутреннего цилиндра происходит вокруг оси A, смещенной по отношению к оси наружного цилиндра O.

По данным Муллина [44а], зависимость емкости от изменения положения внутреннего цилиндра может быть выражена формулой:

$$C = \frac{1}{2\ln\left[\beta + \sqrt{\beta^2 + 1}\right]}, \tag{54}$$

где $\beta = \frac{R^2 + r^2 - d^2}{2Rr}$; здесь d — расстояние между осями цилиндров O и O_1, зависящее от угла поворота;

$$d = \sqrt{a - b\cos\theta},$$

где $a = \overline{AO}_1^2 + \overline{AO}^2$ и $b = 2\overline{AO}_1 \cdot \overline{AO}$.

Преимущества этого конденсатора (экранирующая роль наружной обкладки и возможность вычисления его индуктивности, что важно при измерениях на высокой частоте) не искупают основного недостатка — большой сложности изготовления по сравнению с плоским типом конденсатора. Поэтому данный конденсатор не получил широкого распространения.

Цилиндрический конденсатор с поступательным движением пластин состоит из двух коаксиальных цилиндров, у которых может изменяться длина перекрытия l. Поскольку радиусы цилиндров R_1 и R_2 постоянны, по формуле (4) находим:

$$C = \frac{l}{2\ln\frac{R_1}{R_2}} = kl, \tag{55}$$

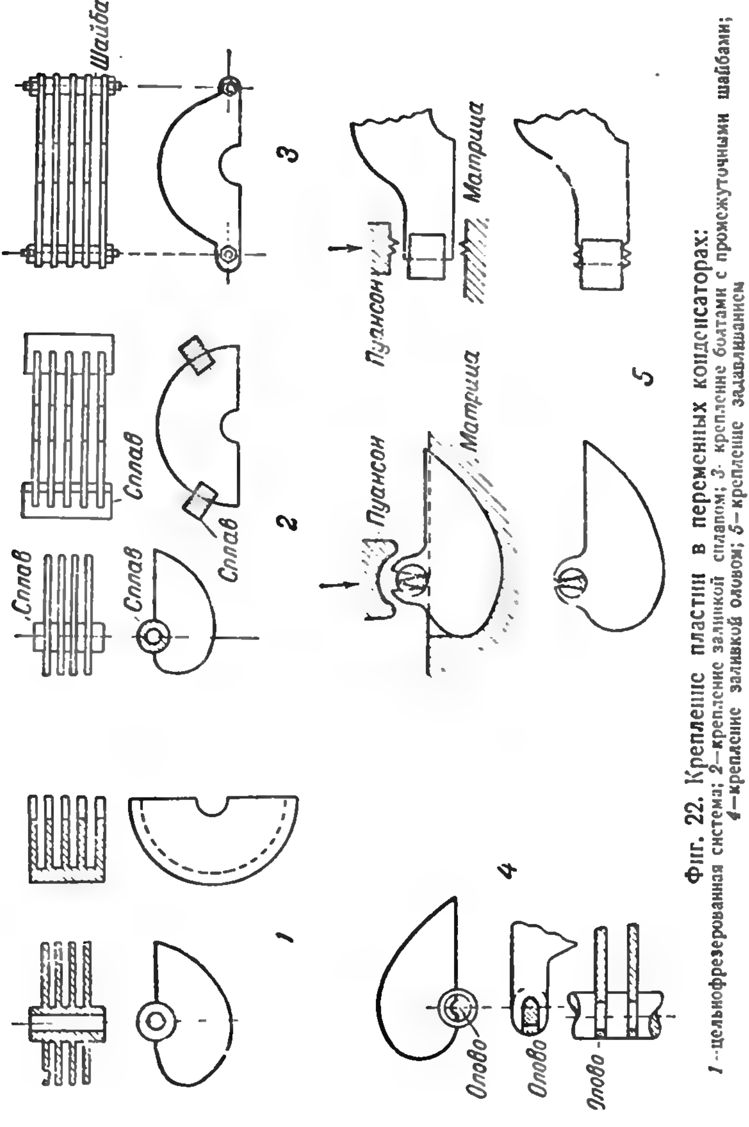
т. е. емкость такого конденсатора изменяется пропорционально длине перекрытия (глубине вдвигания внутреннего цилиндра). При $l = 0$, т. е. при выдвинутом внутреннем цилиндре емкость не равна нулю, а имеет конечное значение C_0, обусловленное емкостью между торцами цилиндров.

Конденсаторы этого типа просты по конструкции и применяются при малых значениях емкости: $C_{max} = 5...20\ \mu\mu F$, обычно в качестве полупеременных конденсаторов (фиг. 29). Начальная емкость этих конденсаторов может быть сделана очень малой: $C_0 = 1\ \mu\mu F$.

§ 21. Конструкция переменных конденсаторов

Основным типом воздушного конденсатора переменной емкости является плоский конденсатор с вращательным движением пластин. С конструктивной точки зрения отдельные модификации этого типа различаются по методу

закрепления пластин статора и ротора [45]. Ряд вариантов системы закрепления пластин показан на фиг. 22.

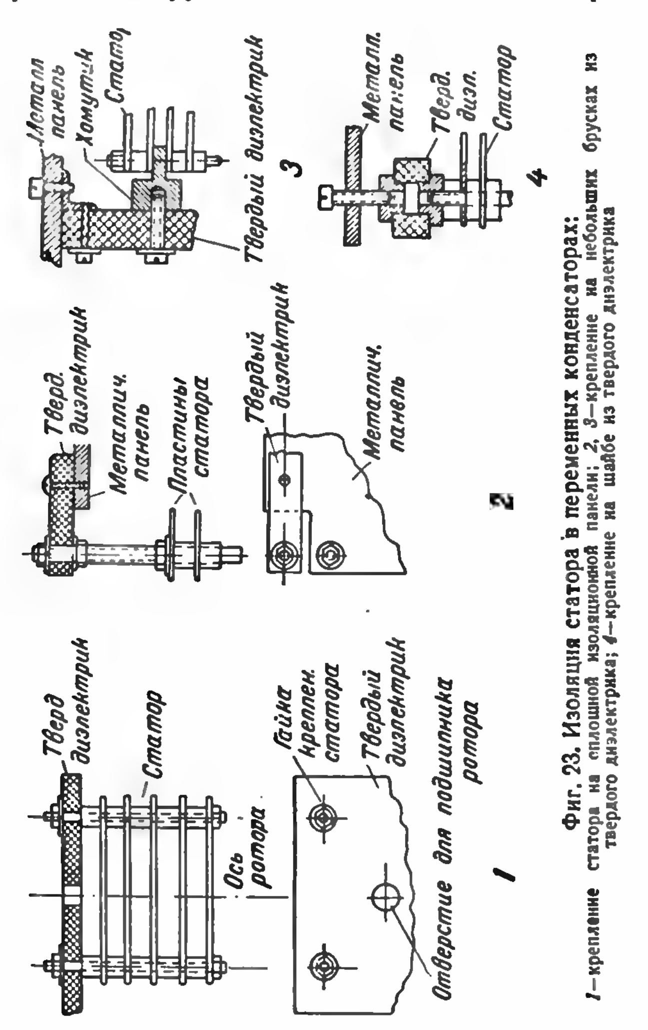


Фиг. 22. Крепление пластин в переменных конденсаторах:
1—цельнофрезерованная система; 2—крепление заливкой сплавом; 3—крепление болтами с промежуточными шайбами; 4—крепление заливкой оловом; 5—крепление заваливанием

Изоляцию статора от ротора раньше осуществляли креплением стоек статора на сплошной плате из изолирующего материала; на этой же плате крепили подшипник ротора. Эта система изоляции сохранилась теперь только для конденсаторов малой емкости; для конденсаторов большой

емкости применяют металлическую плату, с которой электрически соединяется ось ротора.

Для изоляции статорной системы от металлической платы применяют бруски или шайбы небольших размеров,

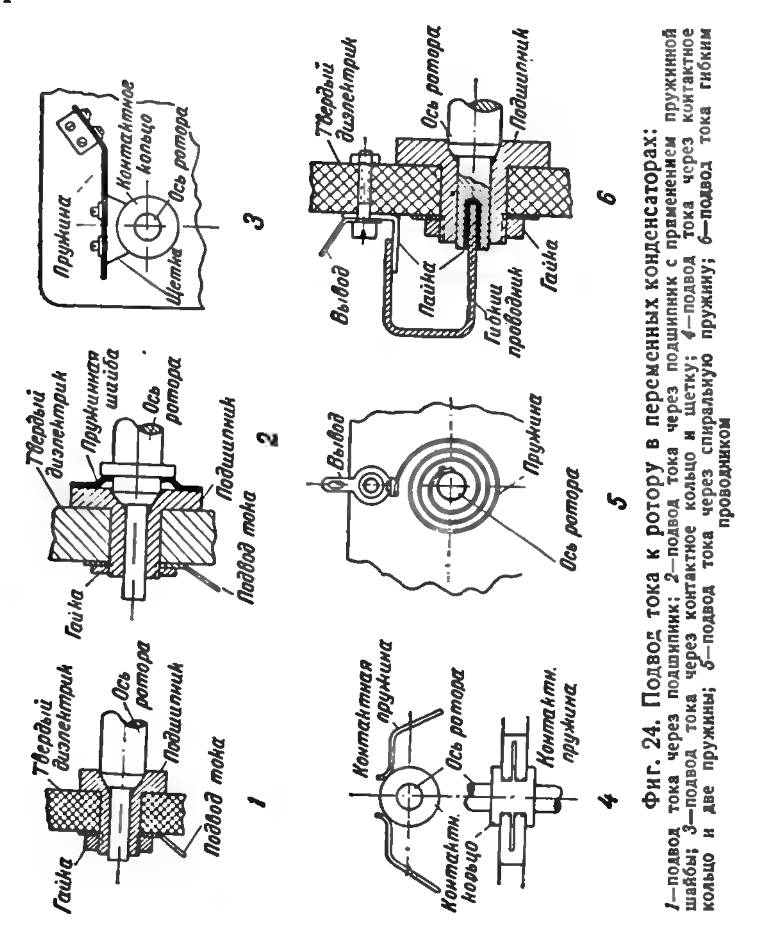


Фиг. 23. Изоляция статора в переменных конденсаторах:
1—крепление статора на сплошной изоляционной панели; 2, 3—крепление на небольших брусках из твердого диэлектрика; 4—крепление на шайбе из твердого диэлектрика

изготовленные из твердого диэлектрика обычно из высокочастотной керамики (фиг. 23).

Угол потерь воздушного конденсатора зависит не только от качества твердого диэлектрика, изолирующего статор от ротора, и от его количества в конденсаторе, но и от величины потерь в металлических частях конденсатора. Среди этих потерь большую роль играют потери в переход-

ном сопротивлении контактной системы ротора; поэтому это сопротивление надо сводить к минимуму. Различные варианты системы подвода тока к оси ротора приведены на фиг. 24.



Фиг. 24. Подвод тока к ротору в переменных конденсаторах:

1—подвод тока через подшипник; 2—подвод тока через подшипник с применением пружинной шайбы; 3—подвод тока через контактное кольцо и щетку; 4—подвод тока через контактное кольцо и две пружины; 5—подвод тока через спиральную пружину; 6—подвод тока гибким проводником

В коротковолновых конденсаторах для уменьшения потерь в обкладках иногда применяют серебрение пластин. Эти потери обусловлены, главным образом, явлением скин-эффекта, т. е. вытеснением линий тока к поверхности пластин.

Для легкости вращения ротора современные конденсаторы, особенно большой емкости и лабораторного типа, снабжаются шариковыми подшипниками. Вращение ротора в этих конденсаторах обычно осуществляется при помощи червячной передачи. Для обеспечения стабильности емкости ротор должен быть механически отбалансирован.

Иногда при этом возникают затруднения из-за вытянутой формы пластин ротора в некоторых специальных типах конденсаторов. Гриффитс предложил изготовлять такие конденсаторы из увеличенного числа пластин переменной формы; это дает возможность получать нужный закон изменения емкости при уменьшенной длине пластин [46].

Если необходимо обеспечить высокие значения электрических свойств конденсатора, то, кроме правильного выбора материалов и конструкции, нужно обеспечить высокую точность обработки деталей. При изготовлении переменных конденсаторов лабораторного типа фирма Дженерал Рэдио К° (США) применяет при обработке разделительных шайб допуск по толщине $\pm$ 0,006 mm, при обработке червяка допуск по радиусу $\pm$ 0,005 mm, а при обработке оси ротора $\pm$ 0,0125 mm.

При сборке конденсатора допуск на эксцентриситет червячного колеса установлен $\pm$ 0,05 mm. Сборку пластин статора и ротора производят в специальном приспособлении, обеспечивающем строгую параллельность пластин с последующей проверкой всех зазоров между пластинами. После сборки производят „старение" конденсатора путем прогрева в течение нескольких часов при повышенной температуре и последующего медленного охлаждения. Этим устраняют опасность нарушения стабильности конденсатора, вызываемую остаточными механическими напряжениями, которые создаются деформацией деталей при сборке [47].

§ 22. Электрические свойства перемениых конденсаторов

По применению переменные конденсаторы можно разбить на следующие основные группы:

1) Конденсаторы для измерительной техники (лабораторные)

$$U_{раб} \leq 500...1000\ V;\quad C_{max} \leq 1000...5000\ \mu\mu F.$$

2) Конденсаторы для радиопередатчиков

$$U_{раб} \leq 2...5\ kV;\ C_{max} \leq 5000\ \mu\mu F,$$

3) Конденсаторы для радиоприемной аппаратуры

$$U_{раб} \leq 500\ V;\ C_{max} = 125...500\ \mu\mu F.$$

Конденсаторы первой группы должны иметь большую точность градуировки, высокую стабильность емкости и малый $tg\delta$. Конденсаторы второй группы должны также обладать большой стабильностью и малым $tg\delta$, но точность градуировки у них может быть ниже. Конденсаторы третьей группы могут иметь пониженные электрические свойства.

Современные переменные конденсаторы высокого качества имеют следующие характеристики:

точность градуировки	от 0,5...1 μμF до 0,01 μμF
стабильность емкости во времени	от 0,1 до 0,01 μμF
температурный коэфициент емкости	$+0,001...0,002\%$ на 1° С
тангенс угла потерь	меньше $1 \cdot 10^{-4}$
индуктивность	0,025...0,065 μH
начальная емкость	$C_0 = (0,05...0,10)\ C_{max}$ при $C_{max} > 1000$ μμF
	$C_0 = (0,15...0,30)\ C_{max}$ при $C_{max} = 100...500$ μμF.

Угол потерь переменного конденсатора заметно зависит от частоты и от установленного значения емкости конденсатора (от положения ручки ротора).

Эту зависимость можно выразить формулой Гриффитса [48]:

$$\operatorname{tg}\delta = \omega C R_м + \frac{\alpha}{C} + \frac{1}{\beta\omega C} \tag{56}$$

Здесь:

C — емкость, установленная по шкале конденсатора в F,

$R_м$ — сопротивление металлических частей конденсатора в Ω,

α — $C' \operatorname{tg}\delta'$, где C' — емкость, обусловленная твердым диэлектриком, а δ' — угол потерь этого диэлектрика,

β — сопротивление утечки по поверхности твердого диэлектрика в Ω,

ω — угловая частота.

Согласно формуле (56) кривые $\operatorname{tg}\delta = f(C)$ и $\operatorname{tg}\delta = f(\omega)$ должны проходить через минимум. Это подтверждается характером экспериментальных кривых, приведенных на фиг. 25 и 26.

Кривые на фиг. 25 показывают, что угол потерь конденсатора с кварцевой изоляцией меньше, чем при керамической изоляции.

Это справедливо при небольшой влажности воздуха. При повышенной влажности кварц дает худшие результаты, чем керамика (табл. 3).

Таблица 3

Сравнение качества воздушных переменных конденсаторов с керамической и с кварцевой изоляцией

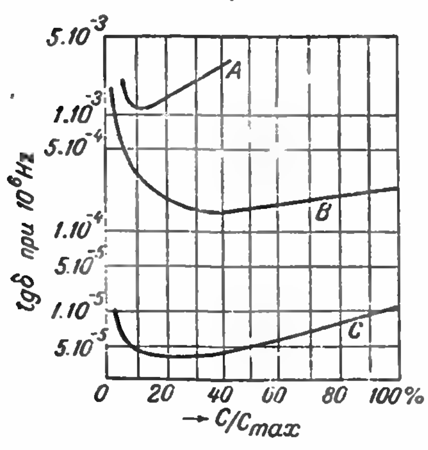
Изоляция	Коэфициент качества	Сопротивление изоляции, MΩ
Керамика (Айсолантайт)	$0,040 \cdot 10^{-12}$	1 000 000
Кварц при низкой влажности	$0,003 \cdot 10^{-12}$	100 000 000
Кварц при высокой влажности	$0,100 \cdot 10^{-12}$	1 000

Для оценки потерь конденсатора американцы вместо tgδ применяют иногда „коэфициент качества".

$$k = R\omega C^2 = C\,\mathrm{tg}\,\delta \qquad (57)$$

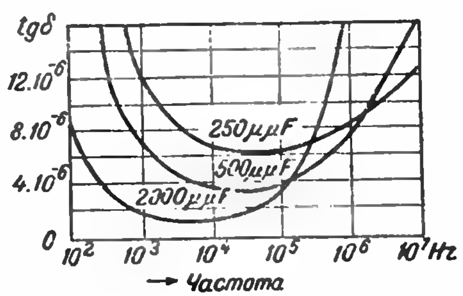
Если потери в металлических частях конденсатора малы (при пониженных частотах), величина k в отличие от tgδ не зависит от введенной емкости и мало изменяется с частотой.

Переменные конденсаторы, применяемые в радиоприемной аппаратуре, имеют значительно более низкие электрические свойства по сравнению с приведенными выше:



Фиг. 25. Зависимость угла потерь переменных конденсаторов лабораторного типа от величины введенной емкости:

A—конденсатор с эбонитовой изоляцией (Сюлливан); *B*—конденсатор с керамической изоляцией (Дженерал Рэдио); *C*—конденсатор с кварцевой изоляцией (Сюлливан)



Фиг. 26. Зависимость угла потерь от частоты при разных значениях введенной емкости для переменного конденсатора с кварцевой изоляцией C_{max}=2000 μμF (Гриффитс)

точность градуировки (отклонение от правильной кривой зависимости емкости от угла поворота) . до 5 %
температурный коэфициент емкости при C_{max} . . . 0,004...0,006% на 1°C
„ „ „ „ C_0 . . . . 0,006...0,010% на 1°C
тангенс угла потерь tgδ . . . . 0,0005...0,0010

Еще более низкие значения электрических свойств имеют переменные конденсаторы „с твердым диэлектриком", у которых для увеличения емкости проложены между пластинами прокладки из эбонита или ацетилцеллюлозы.

§ 23. Температурный коэфициент емкости воздушного конденсатора

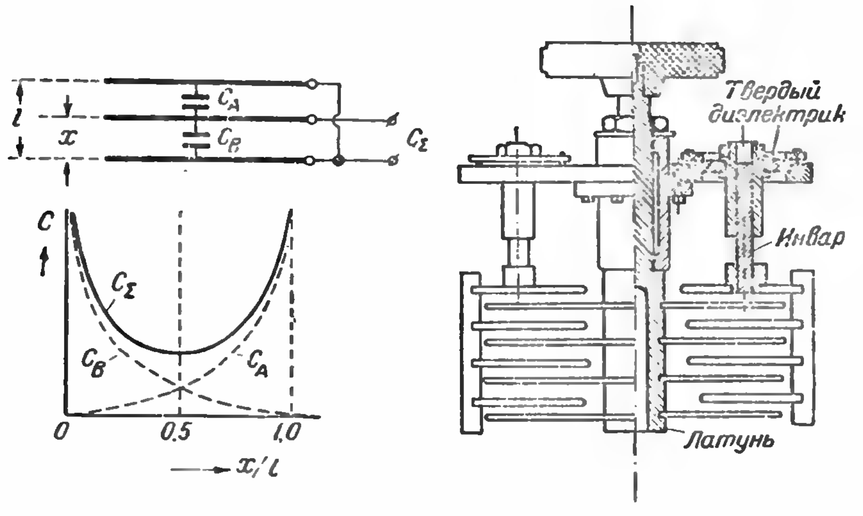
Температурный коэфициент ε воздуха равен $2 \cdot 10^{-6}$ на 1°C; температурный коэфкциент емкости α_t воздушного конденсатора обычно в десять раз выше этого значения. Такое расхождение вызывают следующие факторы:

1) Расширение пластин при нагреве, вызывающее увеличение площади обкладок.

2) Расширение разделительных втулок, вызывающее увеличение зазора (особенно сильно влияет при недостаточно точной сборке).

3) Прогиб пластин конденсатора, обусловленный неравномерным расширением его деталей при нагреве вследствие разной их теплоемкости и теплопроводности.

4) Изменение диэлектрической проницаемости и размеров твердого диэлектрика при нагревании.



Фиг. 27. Зависимость емкости конденсатора с тремя пластинами от положения средней пластины

Фиг. 28. Переменный конденсатор с температурной компенсацией, по Томасу

Если влияние двух последних факторов невелико, то величину температурного коэфициента емкости можно вычислить по формуле [49]:

$$\alpha_t \approx 2\alpha_1 - \alpha_2, \tag{58}$$

где

α_1 — коэфициент линейного расширения материала пластин,

α_2 — коэфициент линейного расширения материала втулок.

Влияние точности сборки на величину α_t можно объяснить следующими соображениями (фиг. 27).

В простейшей системе из трех пластин суммарная емкость: $C_\Sigma = C_A + C_B$ зависит от соотношения зазоров, т. е. от величины $\frac{x}{l}$.

При расположении средней пластины точно в середине расстояния между крайними $\left(\frac{x}{l}=0{,}5\right)$ емкость C_{Σ} имеет минимальное значение. При этом небольшие изменения $\frac{x}{l}$ дают гораздо меньшие изменения емкости, чем при $\frac{x}{l} < 0{,}5$ или при $\frac{x}{l} > 0{,}5$, когда кривая $C_{\Sigma}=f\left(\frac{x}{l}\right)$ начинает круто подниматься. Так, если при $\frac{x}{l}=0{,}5$ изменение $\frac{x}{l}$ на 0,5% дает изменение емкости на 0,01%, то при $\frac{x}{l}=0{,}4$ то же изменение $\frac{x}{l}$ вызывает изменение емкости, равное 0,41%. Поэтому при правильной сборке $\left(\frac{x}{l}\right.$ близко к $\left.0{,}5\right)$ изменения зазора, вызванные нагревом конденсатора, меньше влияют на его емкость.

Уменьшение емкости при нагреве конденсатора, имеющего $\frac{x}{l} < 0{,}5$ (фиг. 28), по предложению Томаса [50–52] может быть использовано для компенсации увеличения емкости, вызванного тепловым расширением пластин. Этим методом Томас получил $\alpha_t = 5...10 \cdot 10^{-6}$ на 1°C (0,0005...0,0010% на 1°C).

§ 24. Полупеременные конденсаторы

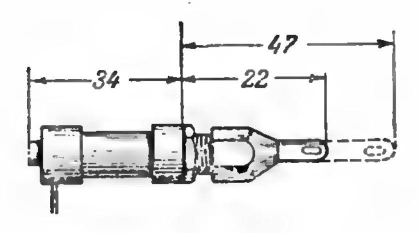
Полупеременный конденсатор (подстроечный, подгоночный, триммерный) должен позволять производить изменение его емкости в процессе регулировки аппаратуры, в которой он используется, с последующей фиксацией оптимального значения емкости, подобранного во время этого процесса. Применяют два основных типа полупеременных конденсаторов: воздушные и воздушно-слюдяные. При емкостях до 10...20 μμF используют воздушные конденсаторы с поступательным движением пластин: плоские или цилиндрические (фиг. 29), при емкостях до 50...150 μμF применяют миниатюрные конденсаторы с плоскими пластинами и вращательным движением [53].

Такие конденсаторы имеют радиус ротора 10 mm и зазор 0,4 mm.

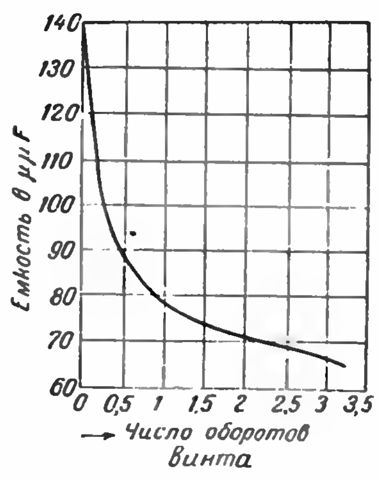
Для фиксирования значения емкости, установленного при подгонке аппаратуры, конденсаторы снабжают стопорным приспособлением.

Когда требуется значение емкости от 100 до 1500...2000 μμF, применяют воздушно-слюдяные конденсаторы. В основе конструкции этих конденсаторов положен принцип поступательного движения плоских пластин. Одна пластина имеет

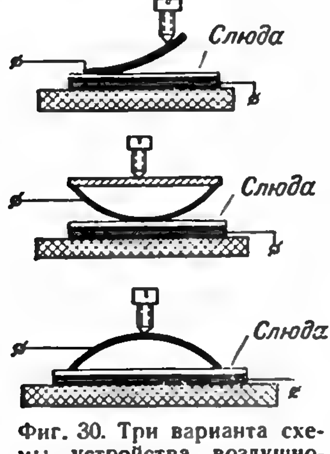
плоскую форму и жестко скреплена с изоляционным основанием; вторая, отделенная от первой слюдяной прокладкой, изготовлена из пружинного материала и вследствие своей упругости стремится отгибаться в сторону от первой пластины (фиг. 30). Нажимая винтом на вторую пластину, можно сближать ее с первой, увеличивая этим емкость конденсатора (фиг. 31).



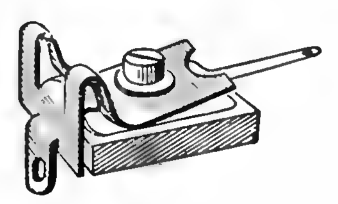
Фиг. 29. Полупеременный цилиндрический воздушный конденсатор: $C_0 = 1$ μμF; $C_{max} = 6$ μμF; $U_{раб} = 500$ V



Фиг. 31. Зависимость емкости воздушно-слюдяного полупеременного конденсатора от числа оборотов винта (Солар)



Фиг. 30. Три варианта схемы устройства воздушно-слюдяных полупеременных конденсаторов



Фиг. 32. Воздушно-слюдяной полупеременный конденсатор: $C_0 = 5$ μμF; $C_{max} = 20$ μμF; $U_{раб} = 500$ V.

Применение слюдяной прокладки позволяет уменьшить размеры конденсатора по сравнению с чисто воздушным. Это обусловлено тем, что часть объема воздуха заменена слюдой ($\varepsilon = 6...7$) и тем, что можно резко уменьшать зазор, не опасаясь короткого замыкания между пластинами при перекосе. Для получения большой емкости применяют не-

сколько пластин, разделенных соответствующим числом слюдяных прокладок.

По электрическим характеристикам воздушно-слюдяные конденсаторы уступают чисто воздушным. Для конденсаторов на керамическом основании фирма Солар (США) дает следующие показатели качества:

стабильность емкости во времени в нормальных условиях $\pm 1\%$,
приращение емкости в условиях высокой влажности 0,5...1%,
температурный коэфициент емкости $\alpha_t = +0{,}03\%$ на 1°C,
угол потерь в нормальных условиях $\operatorname{tg} \delta = 0{,}001...0{,}002$,
угол потерь после действия влажности $\operatorname{tg} \delta = 0{,}003...0{,}004$.

Конденсаторы на основании из пластмассы дешевле, чем конденсаторы на керамическом основании, но обладают еще более низкими электрическими свойствами.

Некоторые фирмы изготовляют воздушно-слюдяные конденсаторы не только большой, но и малой емкости, до 10...20 μμF (фиг. 32). При таких значениях емкости в последнее время наряду с воздушными и воздушно-слюдяными полупеременными конденсаторами начали применять также и керамические (§ 41).

§ 25. Газонаполненные конденсаторы

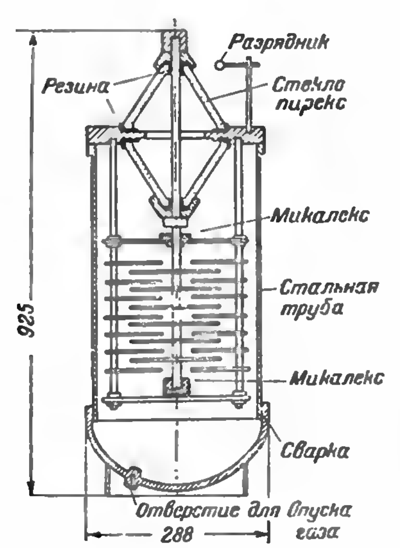
Применяя газ при повышенном давлении, можно значительно повысить электрическую прочность конденсатора с газообразным диэлектриком и уменьшить его габарит. Первые конденсаторы такого типа были изготовлены Фессенденом [1] около 40 лет назад с применением сжатого воздуха при давлении 13...19 атмосфер. Позже цилиндрические газонаполненные конденсаторы изготовляла фирма Гартмани и Браун для применения в схеме моста Шеринга в качестве высоковольтных эталонов емкости [54]. Конденсаторы наполнялись сжатым азотом и имели следующие номинальные данные: $C = 100$ μμF при $U_{раб} = 70...150$ kV и $C = 42$ μμF при $U_{раб} = 300$ kV.

В последнее время перед войной эта фирма начала изготовлять конденсаторы для $U_{раб} = 500$ kV, емкостью 42 μμF.

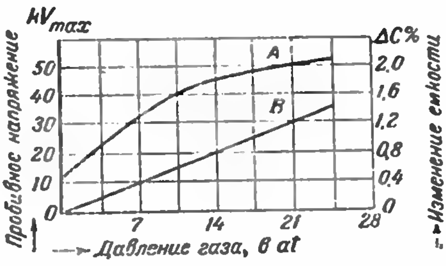
При разработке газонаполненных конденсаторов основной трудностью являлось создание вполне герметичной конструкции, обеспечивающей малую утечку газа.

Эту трудность преодолели американские фирмы, поставившие производство конденсаторов плоского типа, наполненных сжатым азотом и предназначенных для работы в контурах радиопередатчиков (фиг. 33). Зависимость пробивного напряжения и емкости газонаполненного конденсатора от давления газа приведена на фиг. 34. Фирма Гейнц и Кауфман применяет рабочее давление 20...22 kG/cm². Кон-

денсаторы этого типа изготовляются с емкостью 250...1500 μμF при рабочем напряжении 7,5...15 kV (эффективное значение при частоте 1 MHz и модуляции 100%). При повышении частоты для предупреждения возможности перегрева конденсатора, вызванного увеличением потерь в выводном изоляторе и в металлических частях, рабочее напряжение надо снижать. По данным фирмы Лапп Инсулэйтор К°, при переходе от 1 MHz к 3,5 MHz рабочее напряжение надо снизить на 50%; по данным фирмы Гейнц и Кауфман, при 10 MHz рабочее напряжение не должно превышать 1 kV [55].



Фиг. 33. Газонаполненный конденсатор фирмы Гейнц и Кауфман; 1500 μμF



Фиг. 34. Зависимость пробивного напряжения *A* и емкости *B* газонаполненного конденсатора от давления газа (Гейнц и Кауфман)

Эти фирмы изготовляют газонаполненные конденсаторы как постоянной, так и переменной емкости; для последних характерна высокая начальная емкость $C_0 = (0{,}25...0{,}5)\ C_{max}$. В СССР также проводились успешные опыты по изготовлению газонаполненных контурных конденсаторов [56]. Такие конденсаторы целесообразно применять при частоте 0,5...1,5 MHz (длина волны 200...600 m).

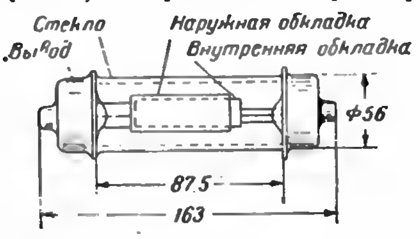
При более низких частотах выгоднее использовать слюдяные контурные конденсаторы; при более высоких частотах газонаполненные конденсаторы делаются невыгодными вследствие резкого снижения рабочего напряжения. Кроме того при повышении частоты снижается емкость контуров, а при малых емкостях удельный объем газонаполненного конденсатора на единицу емкости сильно возрастает. В этой области частот выгоднее применять вакуумные конденсаторы.

По данным работ ЛФТИ [56а], при изготовлении газонаполненных конденсаторов хорошие результаты можно

получить, заменяя азот гексафторидом серы („элегаз"), обладающим при равных значениях давления резко повышенной электрической прочностью (в 2,5 раза).

§ 26. Вакуумные конденсаторы

Применение вакуума дает больший выигрыш в электрической прочности, чем повышение давления газа, но требует еще большей герметизации конструкции конденсатора. Производственный выпуск вакуумных высокочастотных конденсаторов наладила в 1939 г. фирма Эйтель Мак Келло (США). Устройство и размеры вакуумного конденсатора этой фирмы, близкого по конструкции к генераторной лампе, приведены на фиг. 35.



Фиг. 35. Вакуумный конденсатор фирмы Эйтель Мак Келло; 50 μμF, рабочее напряжение 32 kV

Во время войны выпуск вакуумных конденсаторов был освоен целым рядом американских фирм, в том числе Дженерал Электрик, усовершенствовавших конструкцию конденсатора [57a].

Конденсаторы изготовляются теперь емкостью от 3 до 250 μμF* для рабочего напряжения от 5 до 35 kV (максимальное значение при частоте 1 MHz). Рабочий диапазон частот составляет от 1 MHz до 50 MHz. Рабочее значение силы тока конденсатора, в зависимости от его емкости, составляет 20...50 A. Удельный объем вакуумных конденсаторов резко уменьшен по сравнению с газонаполненными:

вакуумный конденсатор при $C = 50$ μμF...8 cm³/μμF,
газонаполненный конденсатор при $C = 1500$ μμF...40 cm³/μμF,
газонаполненный конденсатор при $C = 250$ μμF...160 cm³/μμF.

Эти данные соответствуют рабочему напряжению 15...16 kV, при рабочем напряжении 7,5 kV удельный объем вакуумного конденсатора составляет 2 cm³/μμF.

Такое различие в удельном объеме достигается за счет упрощения конструкции и уменьшения зазора в соответствии с увеличенной электрической прочностью [57].

Температурный коэфициент емкости вакуумных конденсаторов составляет $+27 \cdot 10^{-6}$ на 1°C; особым их преимуществом является независимость пробивного напряжения от высоты над уровнем моря, что представляет собой боль-

* В 1946 г. фирма Дженнингс начала выпуск вакуумных конденсаторов емкостью 1000 μμF, $U_{раб} = 10\,kV_{max}$, $I_{max} = 100$ A, диаметр 118 mm, длина 201 mm.

шое удобство при использовании этих конденсаторов в самолетном оборудовании.

Вакуумный конденсатор находит широкое применение в коротковолновой аппаратуре, особенно авиационной, кроме тех случаев, когда требуется плавно изменяющаяся емкость.*

§ 27. Маслонаполненные конденсаторы

В конденсаторостроении жидкие диэлектрики имеют преимущество перед газами в отношении повышенной электрической прочности $\left(E_{np}=25...30\ \frac{kV}{mm}\ \text{и выше}\right)$ и повышенной диэлектрической проницаемости ($\varepsilon=2...5$). Кроме того, применение жидкого диэлектрика улучшает отвод тепла, выделяющегося в металлических частях конденсатора. Вместе с тем по сравнению с газами жидкости имеют пониженное удельное сопротивление и увеличенный $tg\delta$; недостатком жидкостей является также неполное восстановление электрической прочности после пробоя вследствие их загрязнения продуктами разрушения, образующимися в момент пробоя. К этому можно добавить, что замена газа жидкостью вызывает появление заметной зависимости емкости конденсатора от температуры и частоты.

Для предупреждения утечки жидкости и защиты последней от попадания в нее влаги и пыли конденсатор с жидким диэлектриком должен иметь герметическую конструкцию.

Перед заливкой в конденсатор, для получения достаточно высокой электрической прочности, жидкий диэлектрик должен быть тщательно очищен и просушен, что требует применения специального оборудования. Старение жидких диэлектриков при длительном воздействии повышенной температуры и электрического поля требует периодической замены или регенерации жидкости, залитой в конденсатор, что также создает ряд трудностей.

Раньше маслонаполненные конденсаторы находили себе применение в качестве контурных конденсаторов в мощных радиостанциях и для борьбы с перенапряжениями на линиях передачи.

Конструктивно они представляли собой систему из двух групп металлических пластин, изолированных друг от друга фарфоровыми изоляторами. Такую систему помещали в железный кожух и заливали трансформаторным маслом.

В последующие годы маслонаполненные конденсаторы были вытеснены более совершенными типами конденсаторов:

* В 1945—1946 гг. американские фирмы начали выпуск вакуумных конденсаторов и переменной емкости

газонаполненными, слюдяными и бумажными. Современное конденсаторостроение в течение ряда лет применяло жидкие диэлектрики только для вспомогательных целей — в качестве жидкостей для пропитки бумажных конденсаторов или для заливки слюдяных конденсаторов большой мощности.

По последним данным фирмы Дженерал Электрик (США), маслонаполненные конденсаторы усовершенствованной конструкции с водяным охлаждением снова начинают находить применение в качестве контурных конденсаторов в высокочастотных нагревательных устройствах [57 б]. Номинальная емкость таких конденсаторов 0,0075...0,034 μF; допуск по емкости $\pm 5\%$; рабочее напряжение 2...9 kV; диапазон рабочей частоты 150...550 kHz.

Глава III

КОНДЕНСАТОРЫ С ТВЕРДЫМ НЕОРГАНИЧЕСКИМ ДИЭЛЕКТРИКОМ

§ 28. Стеклянные конденсаторы

Стекло представляет собой прозрачное аморфное вещество, полученное при сплавлении кварца с солями или окислами различных металлов. В интервале размягчения стекло находится в тестообразном состоянии, позволяющем изготовлять стеклянные изделия разнообразными методами: выдуванием, вытягиванием и прессованием.

Электрические свойства стекла в значительной степени зависят от его состава; увеличение содержания щелочных окислов: Na_2O и K_2O повышает диэлектрическую проницаемость, но снижает удельное сопротивление ρ и ухудшает $\mathrm{tg}\delta$, особенно при повышенной температуре [58].

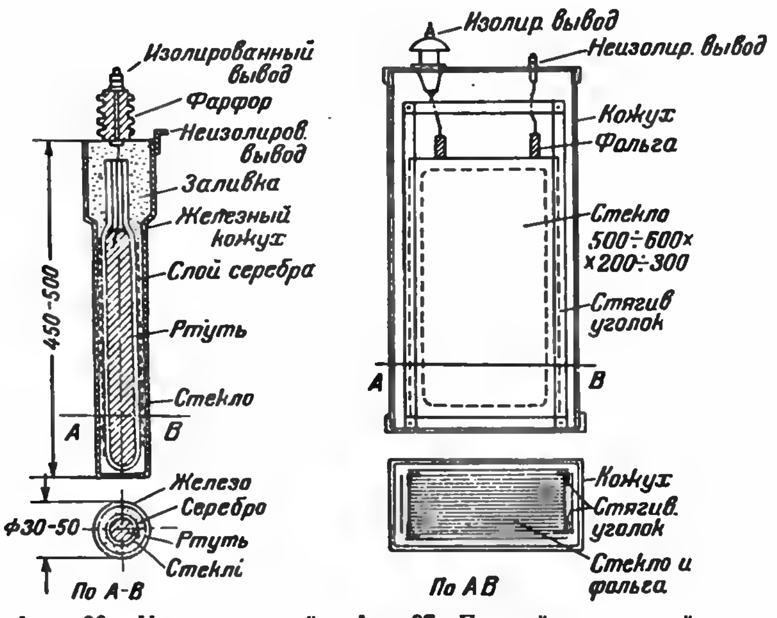
Значительное уменьшение угла потерь стекла можно получить введением в его состав тяжелых окислов, например PbO.

К числу таких стекол относится применяемое в конденсаторостроении стекло „Минос".

Электрические характеристики стекла имеют следующие значения:

удельное объемное сопротивление при 20°C $\rho_v = 10^{15}...10^{16}$ $\Omega \cdot$cm,
температурный коэфициент диэлектрической проницаемости $\alpha_\varepsilon = +0{,}01...0{,}05\%$ на 1°C
пробивная напряженность при частоте 50 Hz... $E_{пр} = 25...30 \frac{kV}{mm}$,
" " " " 1 MHz... $E_{пр} = 10...15 \frac{kV}{mm}$,
рабочее значение напряженности поля при низкой частоте для стекла принимают равным — $E_{раб} = 5...10 \frac{kV}{mm}$.

Удельное поверхностное сопротивление стекла сильно зависит от относительной влажности воздуха и при изменении последней от 20...30% до 80...90% снижается от 10^{14}...10^{15} Ω до 10^8...10^9 Ω. Стеклянный конденсатор является самым старым из существующих типов конденсаторов (§ 2). Он находил себе относительно широкое применение в конце прошлого и в начале текущего века в качестве высоковольтного конденсатора относительно большой емкости. ($U_{раб} \leqslant 50...60$ kV; $C_{ном} \leqslant 4000...5000$ μμF). Конденсаторы изготовлялись как цилиндрического, так и плоского типа



Фиг. 36. Цилиндрический стеклянный конденсатор Мосьцицкого

Фиг. 37. Плоский стеклянный конденсатор фирмы Телефункен

(фиг. 36—37). Удельный объем этих конденсаторов составлял 10...15 cm³/μμF при рабочем напряжении 50 kV [59].

Большим недостатком стеклянных конденсаторов являлась сильная ионизация у краев обкладок, легко приводившая к краевому пробою („краевой эффект"). Мерами борьбы с этим явлением служили: утолщение стекла у краев обкладок, покрытие краев специальной эмалью и заливка конденсаторов маслом. Применение стекла недостаточно высокого качества вызывало повышенное значение угла потерь и создавало опасность теплового пробоя вследствие резкой зависимости tgδ от температуры.

В настоящее время в области технической частоты стеклянные конденсаторы полностью вытеснены более совершенными бумажно-масляными конденсаторами. В области радиочастот стеклянные конденсаторы заменены слюдяными.

Изготовление высокочастотных стеклянных конденсаторов сохранилось в ограниченных размерах перед войной лишь в Германии, где слюда служит предметом импорта [2]. До войны фирма Шотт выпускала плоские стеклянные конденсаторы на рабочее напряжение 6 kV, емкостью от 0,00011 до 0,045 μF для работы в диапазоне частот от 0,6 до 3 MHz, с реактивной мощностью до 4 kVAR и цилиндрические конденсаторы с максимальным рабочим напряжением до 25 kV (пик) мощностью до 100 kVAR.

§ 29. Кварцевые конденсаторы

Кварц, представляющий собой чистую окись кремния, встречается в природе в виде крупных кристаллов („горный хрусталь“) или в виде кварцевого песка.

```
       O - O          O - O
        \ /            \ /
— Si  —  Si  —  Si  —  Si —
  / \           / \
 O—O           O—O
```

Фиг. 38. Молекула кварца

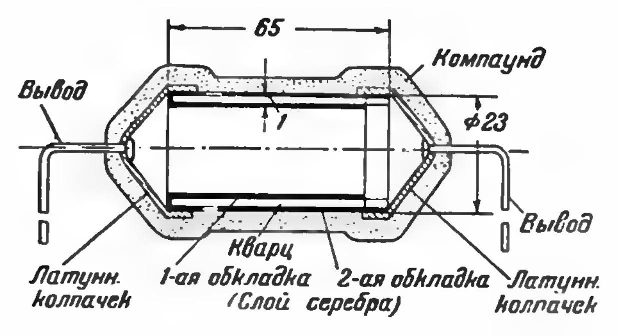
Сплавлением песка получают непрозрачный плавленый кварц: „витреозил“; сплавление мелких кристаллов дает прозрачный плавленый кварц: „кварцевое стекло“. Молекула кварца имеет своеобразное винтовое строение (фиг. 38), объясняющее способность кварца вытягиваться длинными нитями и легкость получения кварцевых трубок.

Прозрачный плавленый кварц имеет высокие электрические свойства:

удельное объемное сопротивление $\rho_v = 10^{18}\,\Omega\cdot\mathrm{cm}$,
тангенс угла потерь . . . . $\mathrm{tg}\,\delta < 0{,}0003$,
диэлектрическая проницаемость . $\varepsilon = 4{,}2$,
температурный коэфициент . . . . $\alpha_t = +0{,}002...0{,}004\%$ на 1°C,
электрическая прочность. . . . . $E_{пр} = 10...15\ \frac{\mathrm{kV}}{\mathrm{mm}}$ (50 Hz).

Кварц применяется в качестве твердого диэлектрика в эталонных воздушных конденсаторах постоянной и переменной емкости. Кроме того, кварцевые трубки можно применить для изготовления стабильных конденсаторов небольшой емкости [60]. Такие конденсаторы были применены одной английской фирмой в высокочастотной телефонной аппаратуре. Опытные кварцевые конденсаторы в СССР изготовлялись на заводе „Красная Заря“ (фиг. 39).

Производство этих конденсаторов не было поставлено, так как оказалось более удобным применить вместо них слюдяные серебрёные конденсаторы.



Фиг. 39. Кварцевый конденсатор: 150 μμF; испытательное напряжение 1000 V

Попытка применить кварцевые трубки для изготовления контурных конденсаторов для радиопередатчиков также не дала эффективных результатов.

§ 30. Конденсаторная слюда

Слюда представляет собой минерал, относящийся к типу алюмосиликатов. Среди многочисленных сортов слюды только калийная слюда (содержащая K_2O — „мусковит") обладает высокими электрическими свойствами, обеспечившими ей широкое применение в конденсаторостроении. Средний состав мусковита: $45{,}2\%\ SiO_2$; $38{,}5\%\ Al_2O_3$; $11{,}8\%\ K_2O$; $4{,}5\%\ H_2O$.

Особенностью слюды, отличающей ее от других минералов и делающей ее особо интересным диэлектриком для конденсаторостроения, является способность слюды легко расщепляться на тонкие пластинки, до нескольких десятков микронов и тоньше.

Al
O O
Si Si
O O
Al

Фиг. 40. Слюдяное кольцо — основа молекулы слюды

Эта способность обусловлена тем, что основные атомы, образующие молекулу слюды (Al, Si, O), расположены в одной плоскости (фиг. 40); в направлении, перпендикулярном этой плоскости, силы внутреннего сцепления ослаблены, что и обеспечивает легкое расслоение по плоскостям спайности.

При толщине пластинок 0,01...0,05 mm слюда бесцветна. Толстые пластинки имеют различную окраску. Наименьший угол потерь имеют розовая, коричневая и золотистая слюды; серебристый мусковит имеет угол потерь до 1,5 раз больше,

а зеленый — в 2,5—3 раза больше, чем мусковит остальных цветов.

Прозрачный мусковит, лишенный дефектов, имеет весьма высокие электрические свойства в направлении перпендикулярном плоскости спайности [5, 61, 62]:

диэлектрическая проницаемость ε . . . . . 6,5...7,
температурный коэфициент α_t . . . . $+0{,}002...0{,}003\%$ на 1° С.
тангенс угла потерь $tg\delta$ . . . . 0,0001...0,00015,
удельное объемное сопротивление ρ_v . . . . . $10^{15}...10^{16}$ $\Omega\cdot cm$,
электрическая прочность при толщине 0,03—
0,05 mm . . . . $E_{np} > 100 \frac{kV}{mm}$
электрическая прочность при толщине
0,01 mm . . . . $E_{np} = 350...450 \frac{kV}{mm}$.

В направлении плоскостей спайности электрические свойства резко снижены: $tg\delta = 0{,}1...0{,}2$; $\rho_v = 10^8...10^9 \Omega\cdot cm$; $E_{np} = 1...2 \frac{kV}{mm}$.

Максимальная температура нагрева для мусковита равна 550...600° С. Дальнейшее повышение температуры приводит к выделению кристаллизационной воды и разрушению кристаллов слюды.

В природе слюда встречается в виде скопления кристаллов в твердых горных породах. Выход слюды из переработанной породы составляет от 1...2 до 10%. В СССР имеется ряд месторождений слюды, из которых основными являются Восточносибирское и Карельское. Заграничное конденсаторостроение применяет обычно индийский мусковит.

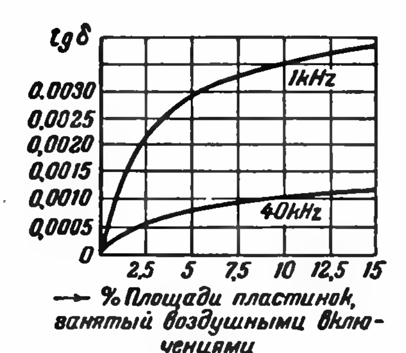
Для изготовления конденсаторов из очищенной слюды вырезают по шаблону прямоугольные пластинки (слюда — „шаблонка"), которые расщепляют до требуемой толщины с допуском ± 5 микрон. Операции расщипки и проверки толщины называют „калибровкой слюды".

По площади пластинок слюда разделяется на „номера". Чем ниже „номер", тем больше площадь пластинки и тем дороже слюда, так как выход пластинок большой площади из общего количества добываемой слюды очень мал.

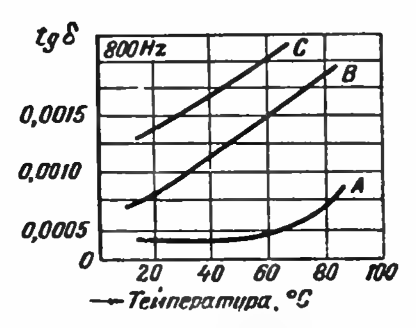
Конденсаторостроение применяет слюду относительно небольших размеров (№ 5—7). Ходовые размеры пластинок: 7×11; 25×35; 40×50 и 40×60 mm; обычная толщина конденсаторной слюды: от 0,02...0,03 до 0,05...0,06 mm; реже применяются пластинки толщиной 0,1...0,2 mm.

Пластинки слюды часто обладают дефектами, вредно влияющими на электрические свойства слюды и понижаю-

щими качество конденсатора. Наличие воздушных включений (пузырьков воздуха, заключенных в плоскостях спайности) приводит к увеличению потерь за счет ионизации



Фиг. 41. Влияние воздушных включений на угол потерь слюды при напряжении менее 100 V (Ренне)

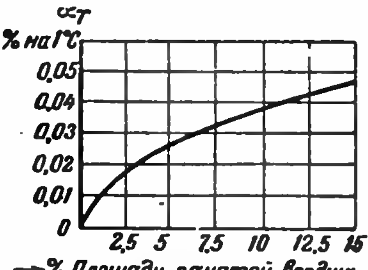


Фиг. 42. Зависимость угла потерь опытных конденсаторов от температуры при различном содержании воздушных включений в слюде (Ренне).

A—чистая слюда; *B*—мелкие пузырьки на 25% площади пластинок; *C*—мелкие пузырьки на 100% площади пластинок

этих включений. Кроме того воздушное включение искажает распределение электрического поля и вызывает появление тангенциальной составляющей, направленной по плоскости спайности.

Поскольку в этом направлении электрические свойства резко ухудшены, наличие воздушных включений дает ухудшение tgδ и при низком напряжении, когда возможность ионизации исключена (фиг. 41). Температурная зависимость угла потерь слюды с воздушными включениями ухудшена по сравнению с чистой слюдой (фиг. 42). Наличие воздушных включений приводит также к возрастанию температурного коэфициента емкости слюдяных конденсаторов (фиг. 43) и к ухудшению их стабильности во времени Пятна, часто встречающиеся в слюде-мусковит, представляют собой инородные включения, расположенные в плоскостях спайности.



Фиг. 43. Зависимость температурного коэфициента емкости конденсаторов типа СЭ от площади пластинок слюды, занятой воздушными включениями (Ренне)

Обычно пятна образуются окислами железа: черные — магнетит $FeO \cdot Fe_2O_3$; красные — гематит Fe_2O_3; желтые — гетит $Fe_2O_3 \cdot H_2O$ [63]. Зеленые пятна также представляют собой соединения железа. Кроме того, черные пятна могут представлять собой включения железистой слюды — биотита, а желтые и коричневые пятна — следы глины [64]. Пятнистость слюды вызывает возрастание угла потерь.

Отдельные пятна могут повысить tgδ до 0,001...0,002; пятна, занимающие 10...15% площади слюдяной пластинки, увеличивают tgδ до 0,005...0,006.

Электрическая прочность слюды также ухудшается при наличии пятен; черные пятна, занимающие 10...12% площади пластинки, могут дать снижение пробивного напряжения на 15...20%; пятна других цветов менее опасны в этом отношении. Наличие пятен дает также ухудшение стабильности емкости конденсаторов во времени и при колебаниях температуры.

Неровности поверхности слюды способствуют образованию воздушных мешков в конденсаторе, что снижает его электрические свойства. Правильная волнистость пластинок (при сжатии такие пластинки выпрямляются) менее опасна, чем неправильная волнистость (при сжатии пластинки полностью не выпрямляются) (табл. 4).

Таблица 4

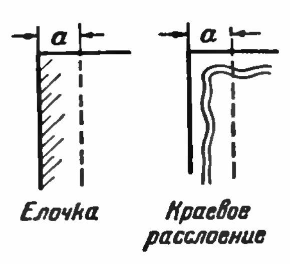
Влияние волнистости слюды на качество конденсаторов

Характер волнистости	Коэфициент нестабильности, k_s% (необратимое изменение емкости конденсатора после прогрева)	Уменьшение емкости конденсатора, сжатого давлением 50...75 kG/cm² после удаления давления, ΔC%
Незаметная	0,032	2,0
Правильная слабая	0,058	2,0
Правильная сильная	0,087	3,0
Неправильная слабая	0,105	4,5—6
Неправильная сильная	0,155	4,5—6

Грубые неровности: складки, горбины и т. д., — помимо образования под ними включений воздуха, опасны тем, что при сильном сжатии конденсатора в местах грубых неровностей могут появиться трещины, резко снижающие пробивное напряжение конденсатора.

При расщипке слюды острым не шлифованным ножом на краях пластинок образуется система трещин: „елочка"; при расщипке тупым ножом образуется частичное расслоение у края слюды, куда заходит воздух: „краевое рас-

слоение" (фиг. 44). Эти дефекты снижают электрическую прочность слюды и заставляют увеличивать расстояние a между краями слюды и обкладок (закраину), что снижает активную площадь обкладок и ухудшает использование слюды. Поверхностные загрязнения слюды в процессе ее обработки (грязь, отпечатки потных пальцев) приводят к увеличению угла потерь конденсатора. Поэтому в производстве ответственных слюдяных конденсаторов необходимо перед сборкой промывать слюду спиртом или другим легколетучим растворителем.



Фиг. 44. Дефекты слюды вызванные расщипкой

§ 31. Общая характеристика слюдяных конденсаторов

Слюдяной конденсатор, правильно изготовленный из слюды, лишенной дефектов, обладает весьма высокими электрическими свойствами: высокой стабильностью емкости во времени, малым α_t, большой точностью емкости (малым отклонением ее значения от номинала), очень малым $\mathrm{tg}\delta$, высоким сопротивлением изоляции и высокой электрической прочностью.

Вместе с тем стоимость слюдяного конденсатора высока как по причине дороговизны исходного материала слюды так и вследствие трудоемкости процесса ручной сборки конденсатора. Точная подгонка емкости также является трудоемкой операцией. Уже при сравнительно небольших значениях емкости, выше 0,01...0,10 μF, размеры слюдяного конденсатора относительно велики, и вес его значителен.

Поэтому применение слюдяных конденсаторов большой емкости (более 0,01 μF) оправдывается только в тех случаях, где полностью используются их высокие электрические свойства (вторичные эталоны емкости, измерительные магазины емкостей, высокочастотные контурные конденсаторы); при изготовлении конденсаторов малой емкости, где требуется лишь одна или несколько маленьких пластинок слюды на каждый конденсатор, применение слюды может быть более широким, так как стоимость слюды в этих случаях играет меньшую роль, а сборка упрощается.

Изготовляемые в настоящее время слюдяные конденсаторы по их применению могут быть разбиты на следующие группы:

1) Конденсаторы для измерительной техники: магазины емкостей и вторичные эталоны емкости.

2) Конденсаторы для высокочастотной телефонии и телефонной измерительной аппаратуры.

3) Конденсаторы для радиопередающей аппаратуры: контурные, блокировочные и аноднораздельные.

4) Конденсаторы для радиоприемной аппаратуры: открытые, запрессованные в пластмассу, серебрёные („стабиль") и намотанные.

§ 32. Обкладки слюдяного конденсатора и система обжимок

В качестве обкладок в слюдяных конденсаторах применяют: металлическую фольгу, прижатую к поверхности слюды, или слой металла, нанесенный непосредственно на поверхность слюды.

В качестве фольги применяют: оловянную, свинцово-оловянную (3% олова, нанесенного на поверхность свинца горячим способом) и красно-медную. Обычная толщина фольги от 0,03...0,04 до 0,06...0,10 mm.

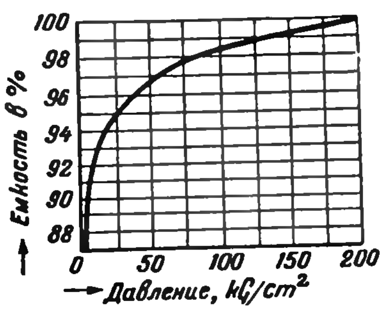
Преимуществами оловянной и свинцово-оловянной фольги являются большая мягкость (хорошее прилегание к поверхности слюды) и легкость пайки. Недостатками этих сортов фольги являются высокое удельное сопротивление (табл. 1), увеличивающее $tg\delta$ конденсатора, и текучесть фольги при сильном сжатии. Текучесть ухудшает стабильность конденсатора, так как с течением времени дает необратимое возрастание емкости вследствие увеличения площади обкладок. Для повышения стабильности таких конденсаторов можно применить искусственное старение, подвергая конденсатор нагреву при определенном режиме в сильно сжатом состоянии [61].

Красно-медная фольга имеет пониженное удельное сопротивление, но вместе с тем повышенную жесткость. Чтобы избежать повреждения слюды, эту фольгу надо отжигать и заглаживать заусенцы у краев. Красно-медная фольга применяется для коротковолновых конденсаторов, у которых особенно важно снизить потери в металле. При изготовлении конденсаторов малой емкости с небольшим числом пластин иногда применяют латунную или бронзовую фольгу, так как в этом случае оловянная фольга не обеспечивает механическую прочность вывода. Применение алюминиевой фольги желательно вследствие ее дешевизны и малого удельного сопротивления, но затрудняется трудностью пайки. Эту трудность можно обойти, применяя специальный метод сборки конденсатора с применением рулонной фольги [65] или применяя сварку для электрического соединения отдельных обкладок одного знака.

Применение фольги в качестве обкладок в слюдяных конденсаторах создает ряд неудобств:

1) Для удаления воздушных зазоров между слюдой и фольгой требуется применение сильного сжатия: при мягкой фольге 50...75 kG/cm², а при жесткой фольге 100...150 kG/cm². Недостаточно сильное сжатие дает сниженную емкость, уменьшенную стабильность емкости и повышает tgδ.

2) Для получения сильного сжатия требуется специальное устройство (обжимки), которое удорожает конденсатор, увеличивает его вес и габарит и создает паразитные емкости, затрудняющие расчет и подгонку емкости и ухудшающие качество конденсатора.



Фиг. 45. Зависимость емкости слюдяного конденсатора с обкладками из свинцово-оловянной фольги от удельного давления на активной площади (Ренне)

Кроме того, при обкладках из фольги появляется зависимость емкости от давления (фиг. 45), вызывающая увеличение температурного коэфициента емкости и уменьшение стабильности емкости во времени вследствие изменения давления на конденсатор с температурой и со временем (температурное расширение и остаточные напряжения в металлических обжимках).

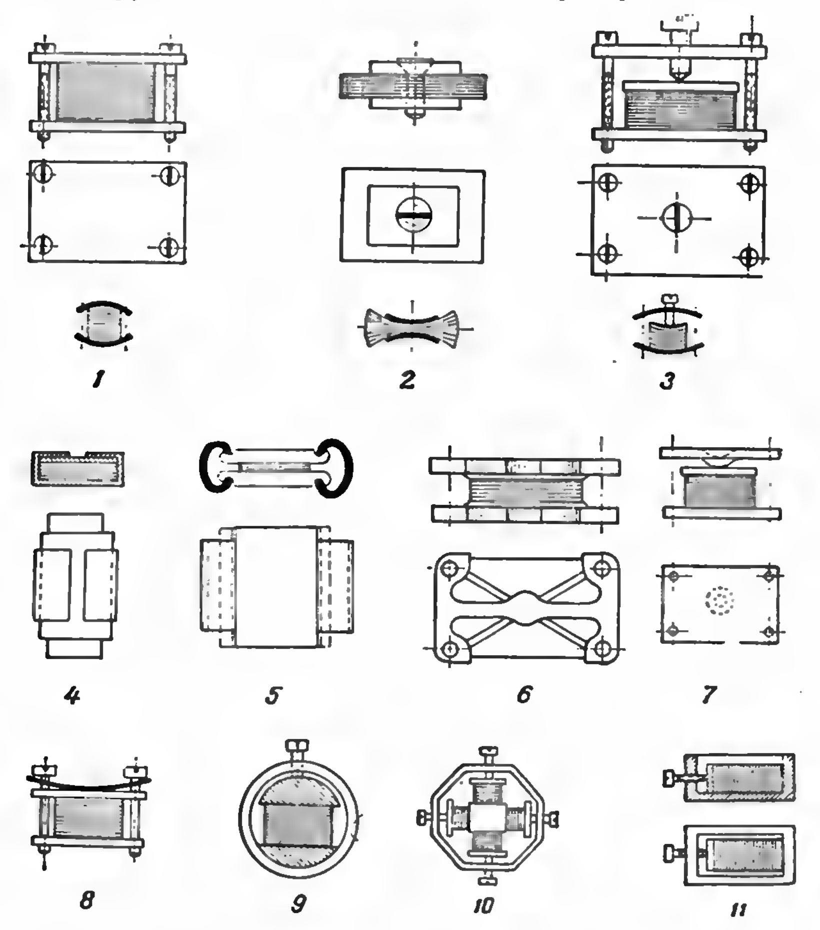
Основные типы обжимок, применяемые в производстве слюдяных конденсаторов, могут быть сведены к трем модификациям (фиг. 46):

1) обжимка с четырьмя винтами,
2) обжимка с одним винтом,
3) обжимка с пятью винтами.

Первая модификация представляет собой простейший тип обжимки и обладает существенным недостатком: неравномерностью распределения давления. При затягивании винтов давление передается краям конденсаторной секции, а средняя часть (активная площадь фольги) остается при пониженном давлении. Вариантами этого типа обжимки являются: металлическая пластина, обжимающая секцию, и обжимные пластины, стянутые стальными полукольцами. Все эти варианты обжимок дают плохой результат как в отношении стабильности емкости во времени, так и в отношении температурного коэфициента емкости. Применяя обжимку с четырьмя винтами, можно получить хороший результат, если использовать массивные литые обжимные пластины с ребрами жесткости, не допускающими дефор-

мации пластин при стягивании винтов, ио такие обжимки дороги и громоздки.

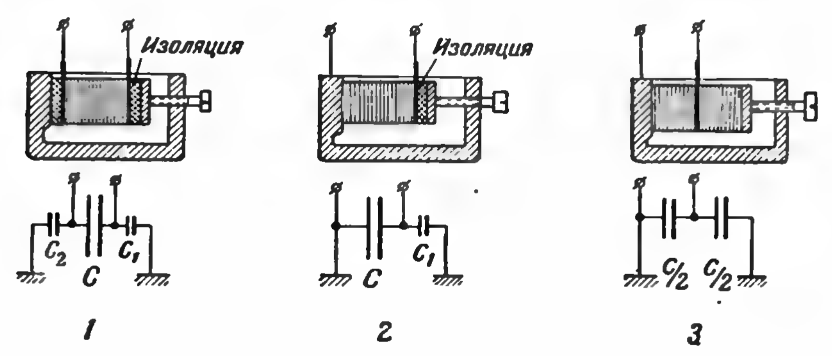
Вторая модификация—обжимка с одним винтом—проста по конструкции и дает более выгодное распределение дав-



Фиг. 46. Различные типы обжимок в слюдяных конденсаторах: *1*—обжимка с четырьмя винтами; *2*—обжимка с одним винтом; *3*—обжимка с пятью винтами; *4*—обжатие секции металлической пластинкой; *5*—обжатие секции стальными полукольцами (фирма Дюбилье); *6*—обжимка секций магазина емкости (фирма Сюллиаан); *7*—обжимка с высадкой аместо пятого винта (завод „Красиая Заря"); *8*—обжимка со стальной пружиной (фирма Дженерал Рэдио); *9*—кольцевая обойма вместо обжимки; *10*—кольцевая обойма для сжатия четырех секций; *11*—корпус вместо обжимки

ления, ио иаличие центрального винта заставляет сверлить слюду, что снижает активную площадь пластинки и дает значительный брак из-за появления трещин при сверловке. Кроме того, при данной конструкции трудно получить требуемую силу сжатия, что приводит к недостаточной стабильности.

Третья модификация — обжимка с пятью винтами — обеспечивает хорошее распределение давления на активной площади и позволяет получить достаточно высокие значения удельного давления. Поэтому, несмотря на большую сложность этой конструкции, она нашла себе широкое применение в виде целого ряда вариантов. В конструкции завода „Красная заря“ центральный винт был заменен высадкой в верхней пластине; в конструкции фирмы Дженерал Рэдио К° центральный винт и верхняя пластина заменены изогнутой стальной пружиной (для ослабления влияния температурного расширения металла обжимок на



Фиг. 47. Паразитные емкости на корпус в слюдяном конденсаторе: *1*—две паразитных емкости (два изолированных вывода); *2*—одна паразитная емкость (один изолированный вывод); *3*—устранение паразитной емкости на корпус

стабильность емкости) [66]. Иногда две пластины и четыре винта заменяют металлической кольцевой обоймой. Некоторые фирмы при изготовлении конденсаторов большой реактивной мощности применяли эту конструкцию для одновременного сжатия в одной обойме нескольких секций. В том случае, когда конденсатор собирается в массивном металлическом корпусе, стенки последнего могут быть использованы в качестве металлической обоймы, заменяющей две пластины и четыре винта.

При сборке слюдяного конденсатора в металлических обжимках приходится изолировать секцию от обжимных пластин.

Для изоляции часто применяют не слюду, а какой-либо другой диэлектрик с худшими электрическими свойствами (микалекс, миканит, гетинакс и т. д.). В этом случае появляются паразитные емкости C_1 C_2 (фиг. 47), обусловленные изоляцией секции от обжимок; емкости C_1 и C_2, присоединяясь параллельно к основной емкости C, могут ухудшить $tg\delta$ и понизить стабильность конденсатора. Соединив один из выводов конденсатора с корпусом, мы избавляемся только от одной из паразитных емкостей. Для того чтобы

исключить обе емкости C_1 и C_2, надо разбить конденсатор на две одинаковые секции, соединенные параллельно.

Для того чтобы обеспечить достаточную стабильность конденсатора, в котором в качестве обкладок применена фольга, необходимо подвергать шлифовке поверхность обжимных пластин, соприкасающуюся с конденсаторной секцией.

Замена обкладок из фольги слоем металла, нанесенного непосредственно на поверхность слюды, гарантирует отсутствие воздушного зазора между слюдой и обкладкой, позволяет уничтожить зависимость емкости от давления и улучшить температурный коэфициент и стабильность емкости. Кроме того, при этом упрощается конструкция и уменьшаются размеры конденсатора. Для непосредственного нанесения на слюду применяют серебро. Этот металл обладает наименьшим удельным сопротивлением (табл. 1), устойчив против окисления и имеет относительно невысокую точку плавления, что при некоторых методах нанесения имеет большое значение.

В конденсаторостроении применяют три основных метода серебрения: химический, керамический, вакуумный.

Химический метод серебрения основан на принципе восстановления металлического серебра из водного раствора. Для получения основного раствора производится смешивание двух растворов, имеющих следующую рецептуру:

1) 15g $AgNO_3$; 55 cm^3 23% NH_3; 2000 cm^3 H_2O,
2) 90g KOH; 750 cm^3 H_2O.

Для получения восстановительного раствора в 250 cm^3 H_2O растворяют 50 g сахара рафинада, после чего добавляют 20 капель H_2SO_4. Неудобством этого метода является необходимость тщательнейшей очистки поверхности слюды и строгого поддержания постоянства температуры при серебрении. Вследствие погружения слюды в водный раствор на ней остаются следы химикалий, которые трудно удалить при промывке. Это часто дает пониженное сопротивление изоляции.

Емкость слюдяного конденсатора, изготовленного из слюды, серебрёной химическим методом, заметно зависит от напряжения [67].

Керамический метод серебрения (метод вжигания) основан на принципе восстановления окиси серебра при повышенной температуре (этот же метод применяют для серебрения керамических изделий). На пластинку слюды кисточкой наносят „краску", полученную растиранием Ag_2O в растворе канифоли на скипидаре (вместо Ag_2O иногда применяют углекислое серебро или мелко диспергированное металлическое серебро). Намазанные пластинки слюды про-

сушивают при 60...70° С, а затем обжигают в муфельной печи при 600° С. После обжига надо охладить пластинки вместе с печью до температуры не выше 50° С. При обжиге органическая связка сгорает, а Ag_2O восстанавливается в виде металлического серебра, образующего слой, прочно сцепленный с поверхностью слюды.

Метод прост, дает конденсаторы хорошего качества и не требует применения сложной аппаратуры [60].*

Вакуумный метод серебрения основан на принципе испарения серебра в вакууме при температуре, близкой к его точке плавления. Пластинки слюды промывают раствором аммиака, высушивают и зажимают в железные рамки, обеспечивающие нужные размеры закраин. Рамки ставят под колпак вакуумной установки, закрывая ими вольфрамовую спираль с кусочком серебра со всех сторон. Под колпаком создают высокий вакуум (остаточное давление $10^{-3}...10^{-4}$ mm ртутного столба); обычно на это требуется 15...20 минут. Далее дают накал вольфрамовой спирали (сила тока 20...30 А) в течение около 1 минуты; в это время происходит серебрение. Далее снимают вакуум и извлекают посеребренные пластинки слюды. Метод обеспечивает высокую производительность и дает конденсаторы хорошего качества [68]. Недостатком его является относительная сложность оборудования. Европейские фирмы для серебрения слюды обычно применяют керамический метод, а американские фирмы чаще используют вакуумный.

В СССР с успехом были опробованы оба этих метода.

Серебрение слюды широко применяется при изготовлении высококачественных слюдяных конденсаторов типа „Стабиль" емкостью до нескольких тысяч μμF. Иностранные фирмы применяют серебрение и при изготовлении слюдяных конденсаторов большой емкости [2].

§ 33. Температурный коэфициент емкости и стабильность слюдяного конденсатора

Температурный коэфициент емкости конденсатора с твердым диэлектриком, в общем случае, может быть выражен формулой [69]:

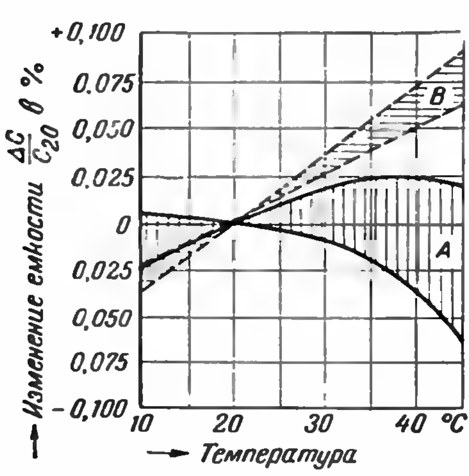
$$\alpha_t = 2\alpha - \gamma + \sigma, \qquad (59)$$

где

α — коэфициент линейного расширения металла обкладок,
γ — коэфициент линейного расширения диэлектрика,
σ — температурный коэфициент ε твердого диэлектрика.

* Используя этот метод, можно наладить непрерывный конвейерный процесс серебрения слюды. (A. Chapman, Electronics, 1945, Vol. 18, № 11, p. 146.)

При изготовлении слюдяных конденсаторов с обкладками из оловянной фольги имеем: $\alpha \approx 27{,}5 \cdot 10^{-6}$ на 1° C; $\gamma \approx 3 \cdot 10^{-6}$ на 1° C и $\sigma \approx 25 \cdot 10^{-6}$ на 1° C; тогда величина $\alpha_t \approx +73 \cdot 10^{-6}$ на 1° C (0,0073% на 1° C); фактически доброкачественные слюдяные конденсаторы, собранные без проклейки парафином, имеют $\alpha_t = +0{,}004\ldots0{,}006\%$ на 1° C [70]. Некоторое отклонение от расчетного значения объясняется тем, что при повышении температуры за счет разности коэфициентов линейного расширения слюды и металла стягивающих винтов уменьшается давление на конденсаторную секцию. Слюдяные конденсаторы, собранные с проклейкой слюды парафином, имеют отрицательное значение температурного коэфициента емкости: α_t=от $-0{,}001\ldots0{,}002$ до $-0{,}010\ldots0{,}040\%$ на 1°C.



Фиг. 48. Зависимость емкости слюдяных конденсаторов от температуры:
A — конденсатор с проклейкой парафином и обкладками из фольги (Гриффитс); *B* — слюдяной серебрёный конденсатор (Ренне)

Это объясняется тем, что в данном случае в формуле (59) в величину σ входит не только температурный коэфициент ε слюды, но и температурный коэфициент ε парафина, который имеет очень большое отрицательное значение: $-2000 \cdot 10^{-6}$ на 1° C. Это значение соответствует повышению температуры от +20° C до +40° C; если расширить верхний предел до +60° C, то величина σ для парафина удваивается.

Подобрав определенный технологический режим изготовления слюдяных конденсаторов с проклейкой парафином, можно получить малые значения α_t, но изменения емкости таких конденсаторов с температурой будут носить не линейный характер (фиг. 48).

Относительно небольшой перегрев (+40...50° C) уже может приводить к необратимым изменениям емкости. Кроме того, при небольших отклонениях от установленной технологии неизбежен большой брак по повышенному значению α_t.

Конденсаторы из серебрёной слюды, согласно формулы (59), должны иметь $\alpha_t \approx \sigma = +20\ldots30 \cdot 10^{-6}$ на 1° C, так как в них свободное расширение обкладок исключено, а величина $\gamma \ll \sigma$. Для серебрёных конденсаторов относительно большой

емкости фактическое значение α_t совпадает с расчетным. Это значение несколько выше нижнего предела, который может быть получен с применением проклейки парафином и обкладок из фольги, но может быть обеспечено совершенно уверенно, с минимальным количеством брака. Кроме того, изменение емкости носит линейный характер и полностью обратимо (фиг. 48). Для серебрёных конденсаторов малой емкости величина α_t может отклоняться от расчетного значения и даже быть отрицательной. Это объясняется влиянием паразитных емкостей, обусловленных церезином, обычно применяемым для покрытия конденсаторной секции с целью повышения ее влагостойкости, или пластмассой, применяемой с той же целью для опрессовки конденсатора. Стабильность емкости слюдяных конденсаторов с обкладками из фольги в условиях их хранения при температуре +18...22° С показана на фиг. 49. В случае применения обжимок с четырьмя винтами (кривые *a*) или с одним винтом (кривые *b*) большие колебания емкости, вызванные небольшими изменениями температуры комнаты, не дают возможности заметить необратимые изменения емкости во времени. В случае применения обжимок с пятью винтами (кривые *c*) температурный коэфициент емкости резко снижен, и можно наблюдать небольшое остаточное возрастание емкости, порядка сотых долей процента. Эти данные получены для конденсаторов, подвергавшихся искусственному старению; конденсаторы той же конструкции, не подвергавшиеся старению, при таких же условиях хранения необратимо увеличивают емкость на 0,5...1%.

Для оценки изменения емкости конденсаторов во времени было предложено [70] определять их коэфициент нестабильности:

$$k_S = \frac{C_1 - C_2}{C_2} \cdot 100 \text{ в } \%, \qquad (60)$$

где C_1—емкость до испытания, а C_2—емкость после прогрева при +50° С и последующего охлаждения до комнатной температуры. Опыт производства конденсаторов типа СЭ (§ 35) показал, что при $k_S < 0,05\%$ остаточное измененне емкости конденсатора за год не превышает 0,1%.

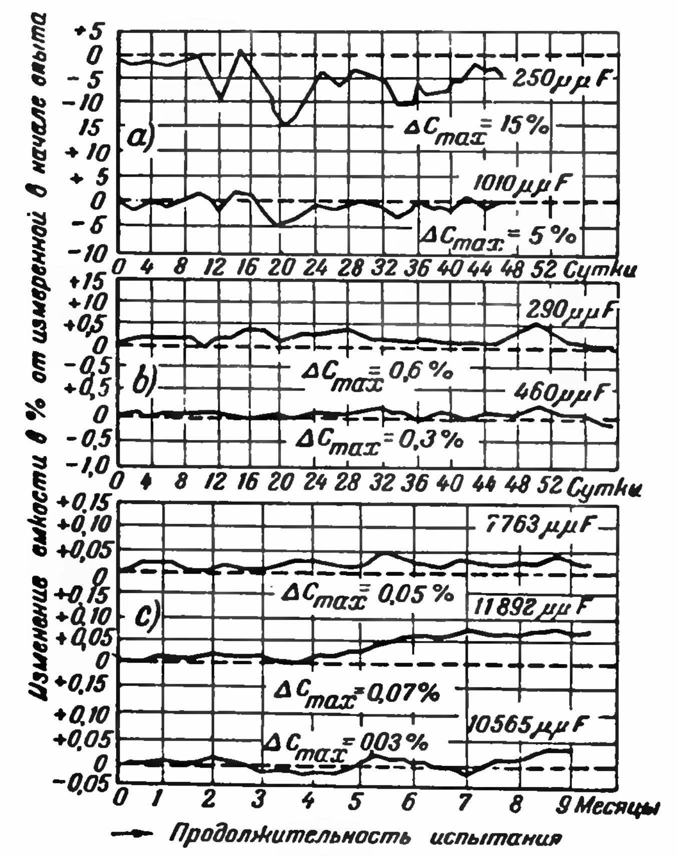
Серебрёные слюдяные конденсаторы имеют еще более высокую стабильность емкости. Фирма Эри подвергла конденсаторы этого типа воздействию 100 температурных циклов при следующем режиме каждого цикла: 15 минут при —60° С; 15 минут прн +93,5° С и 15 минут при +21° С.

После этого испытания изменение емкости не превышало 0,2...0,3%.

Существенной причиной изменения емкости слюдяного конденсатора с течением времени может являться воздей-

ствие влажности. Вода, проникшая внутрь конденсатора и адсорбированная на поверхности слюдяных пластинок, наряду с заметным возрастанием емкости приводит к резкому ухудшению tgδ и сопротивления изоляции.

Для защиты слюдяных конденсаторов от действия влажности применяются следующие основные методы:



Фиг. 49. Изменение емкости слюдяных конденсаторов с течением времени:

a—обжимка с четырьмя винтами; *в*—обжимка с одним винтом; *c*—обжимка с пятью винтами (Ренне)

помещение конденсатора в корпус из металла, керамики или пластмассы и заливка в корпусе влагостойким компаундом;

опрессовка конденсатора пластмассой;

нанесение на конденсатор защитного слоя компаунда;

покрытие конденсатора защитной пленкой лака.

В качестве заливочных компаундов применяют: сплав канифоли с воском или парафином, нефтяной битум, битум

с добавкой масла или галовакса, галовакс с добавкой бензилцеллюлозы или стирола и т. д.

Для заливки контурных конденсаторов применяют: парафин, церезин, минеральное масло и битум. В этих конденсаторах защита от влажности достигается герметизацией конструкции корпуса, а заливка служит для повышения значения ионизирующего напряжения и улучшения теплопередачи к стенкам корпуса.

В качестве пластмассы для опрессовки конденсаторов обычно применяют фенопласт (желательно брать пресс-порошок марки К21-22 или К211-3 [71]), реже полихлорвинил или полистирол. В качестве облицовочного компаунда обычно применяют компаунд на основе галовакса с добавкой битума, бензилцеллюлозы или стирола, иногда с добавкой минерального наполнителя [5].

Во всех рассмотренных случаях происходит заметное возрастание паразитных емкостей конденсатора, которые до заливки или нанесения защитного слоя замыкались через воздух. Поэтому конденсатор малой емкости (менее 1000 $\mu\mu F$) трудно изготовить с теми же значениями α_ℓ и $\operatorname{tg}\delta$, которые удается получить для конденсаторов большой емкости, у которых влияние паразитных емкостей сказывается мало. Разрешения этой задачи можно достигнуть, поместив слюдяной конденсатор в стеклянный баллончик и запаяв последний после откачки из него воздуха. Выводами в таком вакуумно-слюдяном конденсаторе служат проволочки, впаянные в стекло [72].

Такая конструкция конденсатора является абсолютно влагостойкой, но неудобна для конденсаторов большой емкости. Последние для получения вполне надежной влагостойкости надо помещать в герметически запаянный металлический корпус. Для изоляции выводов должны применяться изоляторы из специального стекла или из керамики, припаянные к крышке корпуса (§ 49). Для конденсаторов малой емкости удобно применять керамическую коробочку, запаянную с торцов металлом (или с припаянной керамической крышкой). Другие методы защиты от действия влажности при достаточно большом времени воздействия последней не дают надежных результатов.

Для обеспечения стабильности слюдяных конденсаторов при недостаточной герметизации корпуса фирма Дженерал Рэдио К° применяла засыпку в корпус силикагеля, который должен был поглотить то небольшое количество влаги, которое могло бы проникнуть в корпус с течением времени [66]. Этот метод защиты от действия влажности менее надежен, чем применение полностью герметизированной конструкции

§ 34. Слюдяные магазины емкости

Магазин емкости представляет собой набор слюдяных конденсаторов, снабженный контактным устройством, позволяющим изменять емкость ступенями по 0,001 μF обычно в пределах от 0,001 μF до 1...2μF, в редких случаях до 5 μF. Иногда такие магазины снабжаются вмонтированным в тот же корпус воздушным переменным конденсатором с максимальной емкостью $C_{max} = 0{,}001$ μF. Лучшие образцы современных магазинов емкости имеют весьма высокие электрические свойства. Фирма Сюлливан указывает для выпускаемых ею магазинов следующие значения характеристик:

стабильность емкости на протяжении нескольких лет		0,01...0,02%
точность подгонки емкости	при $C = 0{,}01...0{,}1$ μF	±0,01...0,02%
	при $C = 0{,}001$ μF	±0,05...0,10%
температурный коэфициент емкости	$\alpha_t = -0{,}001...0{,}002\%$ на 1°C	
тангенс угла потерь	при $C = 0{,}001$ μF	$\mathrm{tg}\,\delta = 0{,}0001...0{,}0002$
	при $C = 0{,}001$ μF	$\mathrm{tg}\,\delta$ не более 0,0005
сопротивление изоляции	при $C = 0{,}01...0{,}1$ μF	10 000...20 000 MΩ · μF
	при $C = 0{,}001$ μF	1 000...2 000 MΩ · μF
начальная емкость	при $C_{max} = 1$ μF	$C_0 = 30...35$ μμF

Наряду с этим некоторые фирмы выпускают магазины емкости с недостаточно высокими электрическими свойствами. Испытание магазинов емкости старого изготовления показало, что величина α_t доходила у них до 0,02...0,03% на 1°C, а величина $\mathrm{tg}\,\delta$ до 0,0008 [73].

Допускаемое рабочее напряжение для слюдяных магазинов емкости составляет 300...500 V (постоянный ток или амплитудное значение переменного тока). Это значение напряжения допускается при значении частоты, не превосходящем определенного предела, после которого уже возникает опасный нагрев.

Фирма Дженерал Рэдио К° указывает следующие предельные значения частоты: для секций 0,1 μF — 5 kHz; для секций 0,01 μF — 100 kHz и для секций 0,001 μF — 1000 kHz. При более высоких частотах рабочее напряжение должно быть снижено пропорционально корню квадратному из частоты.

Контактная система в магазинах емкости может быть двух типов: 1) штепсельная и 2) рычажная (курбельная, декадная). Первая система проще и дешевле, но вторая удобнее для работы, так как позволяет более плавно изменять емкость.

При суммарной емкости 1...1,1 μF штепсельные магазины имеют объем 6000...8000 cm³ и вес 3,5...5,5 kG, а рычажные магазины — объем 12 000...25 000 cm³ и вес 8...22 kG.

Некоторые фирмы наряду с магазинами выпускают отдельные слюдяные конденсаторы в качестве вторичных эталонов емкости, гарантируя для них такие же значения электрических свойств, как и для магазинов. Такие эталоны изготовляются с номинальной емкостью от 0,001 до 1 μF. По точности подгонки и стабильности емкости они могут конкурировать с воздушными эталонами емкости (§ 19), обладая вместе с тем резко уменьшенными размерами и весом. По величине $\operatorname{tg}\delta$ и сопротивления изоляции слюдяные эталоны несколько хуже воздушных.

При емкостях ниже 0,001 μF бесспорное преимущество остается на стороне воздушных конденсаторов; влияние паразитных емкостей сильно затрудняет, при этих значениях номинальной емкости, изготовление слюдяного конденсатора с такими характеристиками, которые требуются от эталона емкости.

§ 35. Слюдяные телефонные конденсаторы

В телефонной технике слюдяные конденсаторы применяют в схемах многократной высокочастотной связи (в высокочастотных фильтрах) и в телефонной измерительной аппаратуре. От этих конденсаторов требуется большая стабильность емкости, достаточная точность и малый $\operatorname{tg}\delta$.

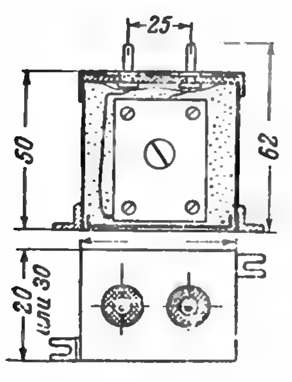
Первым отечественным вариантом телефонного слюдяного конденсатора явился конденсатор открытого типа в обжимках с четырьмя винтами. Такие конденсаторы, изготовлявшиеся в 1932—33 гг., оказались малоудовлетворительными, так как имели высокий температурный коэфициент емкости и малую стабильность. Лучшие результаты дал второй вариант в корпусе из пластмассы [75]. Конденсатор собирали в обжимках с одним винтом, применяя проклейку парафином, проваривали в парафине и, поместив в корпус из пластмассы, заливали в нем парафино-канифольным компаундом. Необходимость дальнейшего повышения качества привела к разработке третьего варианта, получившего название тип СЭ (слюдяной экранированный) [70]. В этом конденсаторе использована обжимка с пятью винтами; сборку секций проводят без проклейки парафином; секцию помещают в металлический корпус и заливают битумом (фиг. 50).

В конденсаторе типа СЭ предусмотрено применение специальной подгоночной секции для окончательной подгонки после заливки (предварительную подгонку проводят удалением нескольких листков фольги или срезанием части одного листка).

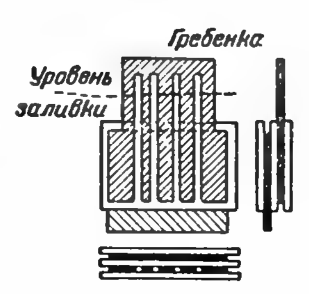
Подгоночную секцию (фиг. 51) собирают из двух пластинок бронзовой фольги: сплошной и разрезной (гребенки),

разделенных слюдяной прокладкой. Эта секция присоединяется параллельно основной секции конденсатора. После заливки емкость конденсатора несколько увеличивается по отношению к ее значению, полученному предварительной подгонкой. Отсоединив часть зубцов гребенки, можно снизить емкость до нужных пределов.

Слюдяные телефонные конденсаторы изготовляют с емкостью от нескольких сотен μμF до 0,1 μF при рабо-



Фиг. 50. Слюдяной телефонный конденсатор типа СЭ



Фиг. 51. Подгоночная секция в конденсаторе типа СЭ

чем напряжении 300...400 V постоянного тока (амплитудные значения переменного тока не свыше 300 V). Сопоставление характеристик отечественных конденсаторов с аналогичными американскими конденсаторами фирмы Дженерал Рэдио К° приведено в табл. 5.

Зависимость емкости от температуры в пределах до +50...60 С имеет практически линейный характер. Угол потерь при повышении температуры увеличивается; до +40° С это увеличение мало заметно, а при +55...60° С составляет около 2 раз по сравнению со значением, измеренным при + 20° С. Зависимость емкости от частоты характеризуется следующими цифрами:

При переходе от постоянного тока к 50 Hz	$\Delta C = -0{,}2...0{,}5\%$,
» » от 50 Hz к 1000 Hz	$\Delta C = -0{,}1...0{,}15\%$,
» » от 1000 Hz к 1000 kHz	$\Delta C < 0{,}1\%$

В этом диапазоне частот изменение емкости с частотой обусловлено снижением ε слюды, а для малых номиналов емкости также и снижением паразитных емкостей [14].

При переходе от частоты 1000 kHz к 10 000 kHz (10 MHz) изменение емкости составляет +5% при номинале 100 μμF, +25% при номинале 1000 μμF. В этом диапазоне частот изменение емкости обусловлено влиянием индуктивности

Таблица 5

Нормы на электрические свойства слюдяных конденсаторов телефонного типа

Характеристика конденсатора	Отечественные конденсаторы			Американские конденсаторы	
	в корпусе из пластмассы	в металлическом корпусе тип СЭ		в корпусе из пластмассы тип 505	в металлическом корпусе тип 509
		до 1000 μμF	выше 1000 μμF		
Точность подгонки емкости	±0,5; 2%	±10	±0,2; 0,3; 0,5%	±10 μμF; ±1%	±0,25%
Температурный коэфициент емкости в % на 1°C	≤0,030	≤0,006	≤0,006	≤0,010	≤0,010
Изменение емкости за 1 год, не более	±1%	±2 μμF	±0,1%	—	±0,1%
Тангенс угла потерь, при частоте 1 kHz	≤0,0010	≤0,0008	≤0,0005	< 0,0005*	≤0,0005
Сопротивление изоляции, MΩ	≥10.000	> 10.000	> 10.000	> 100.000**	> 100.000
Испытательное напряжение постоянного тока, V	1000	1000	1000	500	500

Примечание: * Для малых емкостей норма по tgδ расширена для учета влияния паразитных емкостей: 100 μμF....0,0010; 200 μμF....0,0008; 500 μμF....0,0006.

** Для больших емкостей норма по сопротивлению изоляции расширена: 0,2 μF...50 000 MΩ; 0,5 μF...20 000 MΩ. Сопротивление изоляции для слюдяных конденсаторов данного типа заметно зависит от времени и температуры: переход от времени 1 минуты к 10 минутам (при 100 V) дает увеличение сопротивления изоляции в 4...5 раз (при комнатной температуре).

Переход от температуры +20°C к +50°C дает уменьшение сопротивления изоляции в 10 раз (при выдержке под напряжением, равной 1 минуте).

конденсатора (§ 13). Для американских кондеисаторов тип 505 индуктивность составляет 0,055...0,085 μH. Зависимость угла потерь этих конденсаторов от частоты приведена на фиг. 12 (§ 15). При малом номинале конденсатор имеет увеличенный $tg\delta$ при низких частотах за счет паразитной емкости; при большом номинале конденсатор имеет увеличенный $tg\delta$ при высоких частотах за счет увеличения потерь в обкладках и выводах.

§ 36. Слюдяные конденсаторы для радиопередатчиков

Контурные конденсаторы подвергаются длительному воздействию относительно высокого напряжения при высокой частоте; поэтому вопрос о потерях и об отводе тепла имеет для этих конденсаторов исключительно большое значение. Согласно формуле (41) рассеиваемая мощность пропорциональна U^2 и ω; для снижения этой мощности необходимо уменьшить $tg\delta$ конденсатора.

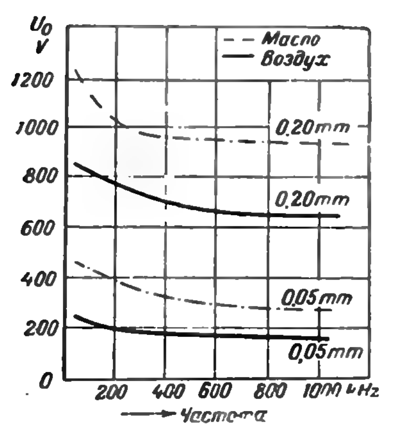
Для уменьшения угла потерь в контурных конденсаторах проводят следующие мероприятия:

применяют слюду высокого качества, устраняют ионизацию у краев обкладок, удаляют воздух из конденсатора вакуумной обработкой, применяют обкладки малого сопротивления и посеребрённые выводы увеличенного сечения.

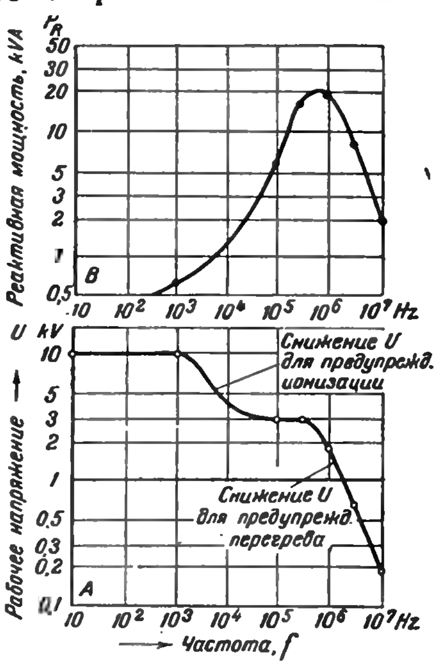
Для устранения ионизации у краев обкладок напряжение на конденсаторной секции $U_{раб}$ надо брать меньше U_0 — ионизирующего напряжения (§ 15). Величина U_0 возрастает с увеличением толщины слюды, но не прямо пропорционально толщине, а замедленно: при увеличении толщины в четыре раза, от 0,05 до 0,2 mm U_0 увеличивается в 1,5... 2 раза. При повышении частоты U_0 заметно снижается: при переходе от частоты 10^5 Hz к частоте 10^6 Hz снижение U_0 составляет 20...25% [76—77]. Величина ионизирующего напряжения зависит от среды: замена воздуха маслом повышает U_0 на 25...30% (фиг. 52). При небольших значениях $U_{раб}$ повышение ионизирующего напряжения до значения $U_0 > U_{раб}$ можно получать, применяя слюду повышенной толщины. При больших значениях $U_{раб}$ выгоднее разбивать конденсатор на ряд последовательно соединенных секций, с таким расчетом, чтобы величина рабочего напряжения на каждой секции была бы меньше U_0, соответствующего выбранному значению толщины слюды.

При заданном числе последовательно соединенных секций рабочее напряжение конденсатора надо снижать при повышении рабочего значения частоты, чтобы учесть снижение U_0 при повышенной частоте. Дальнейшее повыше-

ние частоты создает опасность перегрева конденсатора увеличенной силой тока, а потому для поддержания потерь на определенном уровне надо поддерживать силу тока постоянной при увеличивающейся частоте, т. е. резко снижать рабочее напряжение конденсатора [78]. В соответствии с характером изменения рабочего напряжения с частотой зависимость допускаемого значения реактивной мощности от частоты имеет резко выраженный максимум (фиг. 53). Поэтому слюдяные контурные конденсаторы выгодно при-



Фиг. 52. Зависимость ионизирующего напряжения от частоты для слюды двух толщин на воздухе и под маслом (Жилинский)



Фиг. 53. Зависимость допускаемого рабочего напряжения (*A*) и допускаемой мощности (*B*) от частоты для слюдяного контурного конденсатора 0,001 μF (10 последовательных секций) (Малов)

менять лишь в определенном интервале частот: от нескольких десятков килогерц до нескольких мегагерц. За пределами этого интервала значения объема и веса слюдяного конденсатора, отнесенные к единице реактивной мощности, недопустимо увеличиваются. При частотах ниже указанного здесь интервала бумажно-масляный конденсатор выгоднее слюдяного; при частотах выше этого интервала вместо слюдяного конденсатора выгоднее применить газонаполненный, вакуумный или серный конденсатор. Кроме того в последние годы начали применять контурные керамические конденсаторы (§ 41), которые конкурируют со слюдяными даже в пределах оптимального для последних интервала частот.

В производстве слюдяных контурных конденсаторов, по данным Жилинского [79], применяют следующие значения толщин слюды:

при частоте 10^5 Hz и ниже: 0,05...0,07 mm
„ „ выше 10^5 Hz: 0,10...0,12 mm

Отношение сторон пластинки слюды: $K=\frac{a}{b}$; берут в соответствии с площадью пластинки (фиг. 54); последнюю надо брать возможно малой для снижения стоимости слюды.

Закраины (расстояние между краями слюды и фольги) при толщине слюды 0,05...0,1 берут равными (фиг. 54).

$$\delta_1 = 5...7 \text{ mm}; \ \delta_2 = 3...4 \text{ mm}.$$

При частоте до 10^5 Hz для обкладок берут свинцовую или свинцово-оловянную фольгу 0,02 mm. При большей частоте берут оловянную или красно-медную фольгу и увеличивают ее толщину для снижения потерь в конденсаторе. Выпуск фольги для пайки берут равным 10...15 mm. Допускаемое значение рабочего напряжения на одну секцию принимают равным:

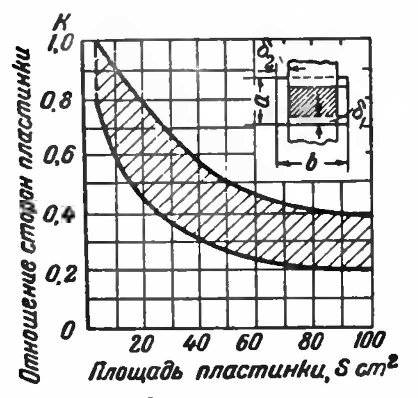
при частоте	50 kHz	700 V *эфф*
„ „	100 „	450 „
„ „	200 „	350 „
„ „	300 „	275 „
„ „	500 „	200 „

Допускаемое значение величины потерь на единицу активной поверхности слюды, по данным Жилинского [79], можно принимать равным: 2,6...2,8 $\frac{\text{mW}}{\text{cm}^2}$.

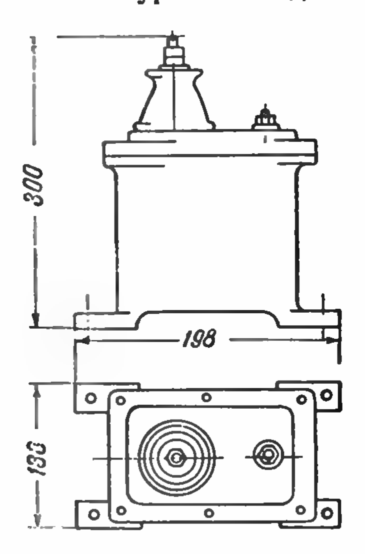
Отечественные слюдяные контурные конденсаторы до последнего времени изготовлялись в массивных литых алюминиевых корпусах для улучшения отвода тепла; тип Дюбилье (фиг. 55). Конденсаторы этого типа изготовлялись для различных значений рабочей длины волны от 250...300 до 2500...3000 метров (10^5...10^6 Hz) с рабочим значением реактивной мощности от 15...30 до 120 kVAR.

В зависимости от рабочего диапазона частоты эти конденсаторы имеют удельный объем от 25...30 до 75...100 cm^3/kVAR и удельный вес от 0,07...0,08 до 0,12...0,16 kG/kVAR. Емкость контурных конденсаторов может лежать в пределах от 500 до 50 000 $\mu\mu$F; допускаемое отклонение емкости от номинала $\pm 5\%$. Гарантированное сопротивление изоляции конденсатора в нормальных условиях 500 MΩ, а после воздействия влажности 90...95% в течение 24 часов и последующего обсыхания в комнатных условиях в течение 4 часов — не ниже 100 MΩ. Испытательное напряжение контурных конденсаторов 10...20 $\text{kV}_{\text{эфф}}$ 50 Hz.

На основе использования заграничного опыта начато изготовление более совершенного типа контурного конденсатора: типа „Фарадон". Этот конденсатор помещается в цилиндрический керамический корпус, закрытый с торцов массивными металлическими крышками,



Фиг. 54. Зависимость наивыгоднейшего отношения сторон пластинки слюды от ее площади (Жилинский)



Фиг. 55. Слюдяной контурный конденсатор типа Дюбилье: 120 kVAR; 160...230 kHz

припаянными к керамике (фиг. 56). В новом типе контурного конденсатора удельный вес снижен в 2...3 раза, а удельный объем—в 3...4 раза по сравнению с конденсаторами старого типа.

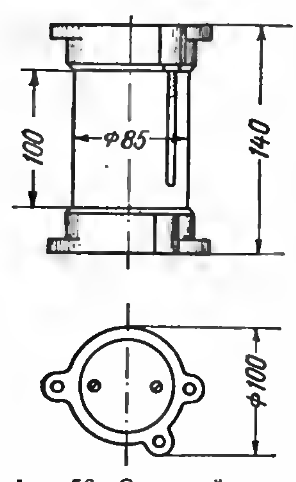
Для заливки контурных конденсаторов раньше применяли парафин или церезин, что давало недостаточно удовлетворительные результаты [71]. В современных конструкциях применяют минеральное масло или битум, а за границей — иногда стирол.

Доброкачественные контурные конденсаторы имеют весьма малый угол потерь:

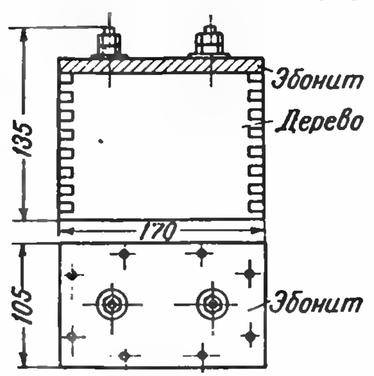
при частоте 10^5...10^6 Hz . . . $\operatorname{tg}\delta = 0{,}0002...0{,}0003$
„ „ 10^7 . . . . $\operatorname{tg}\delta = 0{,}0004...0{,}0006$

Блокировочные и анодноразделительные конденсаторы, применяемые в схемах радиопередатчиков, подвергаются воздействию высокого напряжения постоянного тока с относительно небольшой переменной составляющей высокой частоты, а потому величина $\operatorname{tg}\delta$ имеет для них меньшее значение, чем для контурных конденсаторов. Для изготовления этих конденсаторов допускается применение слюды пониженного качества, например пятнистой. Конденсаторы

изготовляют обычно из слюды толщиной 0,07...0,10 mm (пробивное напряжение 4...6 kV); при значительном рабочем напряжении применяют последовательное соединение секций. Для повышения электрической прочности слюды рекомендуется применять вместо пластинок большой толщины по 2...3 пластинки меньшей толщины, сложенные вместе (упрочне-



Фиг. 56. Слюдяной контурный конденсатор типа Фарадон: 60 kVAR; 0,2 . . . 1 MHz



Фиг. 57. Слюдяной блокировочный конденсатор: 0,0035 μF; рабочее напряжение 20 kV

ние достигается за счет несовпадения слабых мест в отдельных пластинках). Величину закраин следует брать равной [79]

при испытательном напряжении	5 kV . .	$\delta_1 = 12...14$ mm;	$\delta_2 = 7... 8$ mm
» » »	10 kV . .	$\delta_1 = 24...28$ mm;	$\delta_2 = 14...17$ mm

Рабочее напряжение конденсатора берут в 2—3 раза ниже испытательного.

Раньше конденсаторы этого типа собирали в деревянных корпусах и заливали после сборки парафином или церезином (фиг. 57); модернизованный тип анодноразделительного конденсатора изготовляют в цилиндрическом фарфоровом корпусе, рассчитанном на подвесной монтаж, и заливают битумом.

Рабочий интервал температуры для таких конденсаторов составляет от —50 до +70°C.

§ 37. Слюдяные конденсаторы для радиоприемной аппаратуры

В радиоприемной аппаратуре конденсаторы не подвергаются воздействию высокого напряжения при высокой частоте, а потому для них не приходится ожидать возможности опасного разогрева. Вместе с тем и для этих кон-

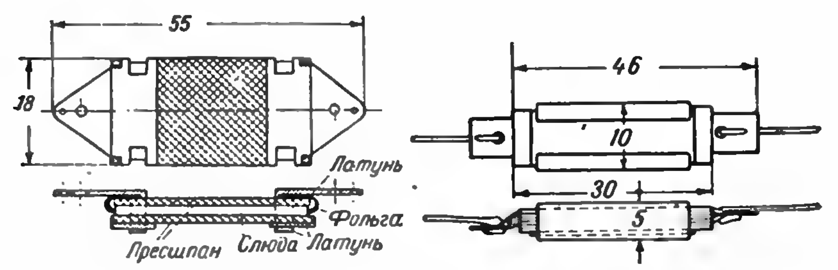
денсаторов надо требовать малого значения tgδ во избежание увеличения затухания в контурах приемника.

Конденсаторы, применяемые в радиоприемной аппаратуре, обычно подвергают испытанию напряжением 1000 V постоянного тока в течение 1 минуты. Максимальное допускаемое рабочее напряжение принимают равным половине испытательного.

По величине допускаемого отклонения емкости от номинала конденсаторы разделяются на три класса:

I класс . . . . . допуск ± 5%,
II класс . . . . . допуск ± 10%,
III класс . . . . . допуск ± 20%.

Для отечественных конденсаторов типа „Стабиль", по особому заказу, может быть обеспечен допуск ± 3% (для



Фиг. 58. Слюдяной конденсатор открытого типа для радиоприемной аппаратуры („Конфетка")

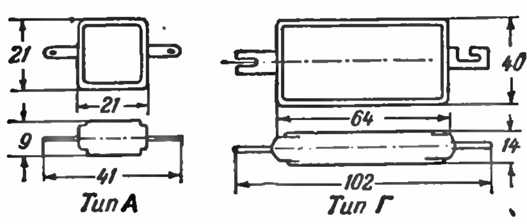
Фиг. 59. Слюдяной конденсатор типа САМ: 5000 μμF; 500 V

емкостей выше 50 μμF); для конденсаторов аналогичного типа некоторые иностранные фирмы гарантируют допуск ± 1%.

Конденсаторы открытого типа изготовляли раньше с обкладками из свинцово-оловянной фольги, которые, после сборки, отгибали и зажимали в латунной арматуре, обжимающей конденсатор (тип „Конфетка", фиг. 58). Новый вариант такого конденсатора изготовляют с обкладками из красно-медной фольги, концы которой выпускают с торцов конденсатора, пропаивают и используют в качестве выводов: тип САМ (фиг. 59). Конденсаторы открытого типа обладают недостаточной стабильностью, особенно в условиях высокой влажности и имеют недостаточно высокие электрические свойства (табл. 6). Американцы называют такие конденсаторы „зубочистками" (toothpick).

Конденсаторы, запрессованные в пластмассу, обладают резко улучшенной влагостойкостью и более высокими электрическими свойствами, чем конденсаторы открытого типа. Эти конденсаторы применяют не только в радиопри-

емной, но и в маломощной радиопередающей аппаратуре, а потому их изготовляют не только для обычного, но и для повышенного рабочего напряжения. При $U_{раб} > 500$ V принимают $U_{ис} = 2U_{раб} + 1000$ V. Отечественные конденсаторы, запрессованные в пластмассу, по габаритам различаются на ряд типов: **тип** 0: 18×11×5,5 mm; **тип** А: 21×21×9 mm; **тип** Б: 41×20×10 mm; **тип** В: 46×27×12 mm и **тип** Г: 44×40×14 mm (фиг. 60). Допускаемая реактивная мощность составляет для типа А: 0,2 kVAR, для типа Б: 0,5 kVAR, для типа В: 0,7 kVAR и для типа Г: 1 kVAR. Нижний пре-



Фиг. 60. Слюдяные конденсаторы, запрессованные в пластмассу

дел емкости для всех типов: 10 μμF; верхний предел при $U_{раб} = 1000$ V составляет для типа А: 2000 μμF, для типа Б: 7000 μμF, для типа В: 15 000 μμF и для типа Г: 30 000 μμF.

Секции конденсаторов изготовляют с проклейкой минеральным маслом; обкладки припаивают к выводам; далее секции вкладывают в „брикеты" (прессованные без нагрева заготовки половинки корпуса). Заложенную в брикеты секцию прессуют горячим прессом при давлении 60...80 kG/cm² и температуре 150...160° С. Для опрессовки обычно применяют фенопласт.

Американские фирмы на конденсаторах, запрессованных в пластмассу, часто указывают номинальную емкость не цифрами, а цветными кружками. При этом применяется следующий цветной код.

Американский цветной код

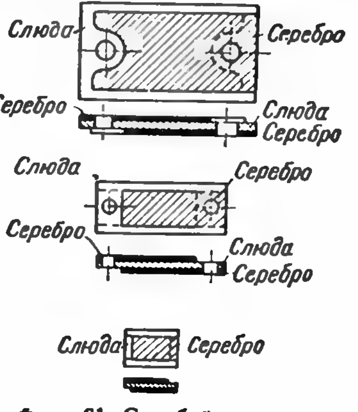
цвет:	черный	цифра:	0	цвет:	зеленый	цифра:	5
„	коричневый	„	1	„	синий	„	6
„	красный	„	2	„	фиолетовый	„	7
„	оранжевый	„	3	„	серый	„	8
„	желтый	„	4	„	белый	„	9

Емкость конденсатора должна быть выражена в μμF с двумя значащими цифрами: левый кружок — первая цифра, средний — вторая цифра, правый — число нулей.

Например: красный-зеленый-красный означает 2500 μμF, оранжевый-синий-черный 36 μμF.

Применяя конденсаторы, запрессованные в пластмассу, надо иметь в виду, что при высокой влажности их влагостойкость недостаточно удовлетворительна.

Серебрёные слюдяные конденсаторы обладают резко повышенной стабильностью и улучшенными электрическими свойствами по сравнению с остальными типами слюдяных конденсаторов (табл. 6). В серебрёных слюдяных пластинках обычно пробивают отверстия для крепления к пластинке вывода (фиг. 61); для очень маленьких пластинок этого сделать нельзя, и тогда крепление осуществляют огибанием пластинки расплющенным концом луженого медного проводника, который и служит выводом.



Фиг. 61. Серебрёная слюда

Серебрёные слюдяные конденсаторы изготовляются иностранными фирмами в трех основных конструктивных модификациях:

1) серебрёная пластинка (или набор пластинок) зажимается в гетинаксовых щечках и защищается лаковым покрытием,

2) серебрёная пластинка запрессовывается в пластмассу или в галоваксный компаунд с минеральным наполнителем,

3) серебрёная пластинка помещается в керамический корпус и заливается в нем компаундом.

При использовании набора слюдяных пластинок контакт между слоем серебра на соседних пластинках осуществляют, прокладывая кусочки оловянной фольги, концы которых припаивают к заклепке, соединенной с выводным проводником.

Подгонку емкости серебрёных конденсаторов производят подчисткой части серебряного слоя. Для защиты от действия влажности во время подгонки, собранную секцию после сушки окунают в церезин. Для того чтобы конденсаторы, содержащие церезин, обратимо меняли емкость с температурой, их подвергают воздействию одного-двух циклов нагрева до +40...50°C [60].

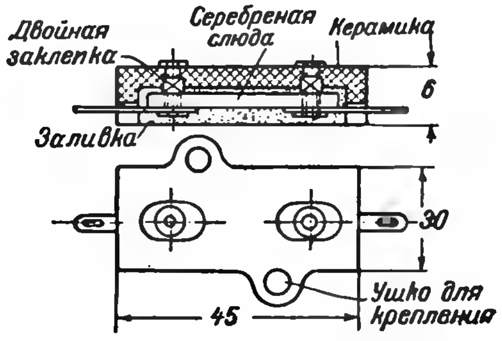
В СССР освоен выпуск серебрёных конденсаторов, запрессованных в пластмассу: тип „Стабиль" (табл. 6). Иностранные фирмы, выпускающие серебрёные конденсаторы в корпусах из керамики, получают более высокие электрические характеристики. Опытные серии аналогичных конденсаторов (фиг. 62), изготовление которых было налажено перед войной на заводе „Красная заря", показали возмож-

Таблица 6

Нормы на электрические свойства слюдяных конденсаторов, применяемых в радиоприемной аппаратуре

Характеристика конденсатора	Отечественные технические условия			Данные фирмы Эри для серебрёных конденсаторов в керамическом корпусе
	открытый тип (САМ)	запрессованный в пластмассу	серебрёный запрессованный (Стабиль)	
Максимальная точность емкости, %	±5	±5	±3	±1
Температурный коэфициент емкости, % на 1°C	±0,150	±0,035...0,150	±0,008	±0,0025...0,004
Остаточное изменение емкости после термического цикла +60°C, %	<1,5	—	<0,3	<0,1
tgδ при 10^6 Hz в нормальных условиях, C<50 μμF	—	<0,0050	<0,0030	<0,0004
То же при C>50 μμF	<0,0030	<0,0025	<0,0020	<0,0004
tgδ при 10^6 Hz после пребывания 48 часов при влажности 95...98% C≤50 μμF	—	<0,0060	<0,0045	—
То же при C>50 μμF	—	<0,0030	<0,0030	<0,0005
Сопротивление изоляции в нормальных условиях, MΩ	>1000	>5000	>5000	—
То же после пребывания 48 часов при влажности 95—98%, MΩ	—	>500	>250	>1000
Сопротивление изоляции при температуре +60°C, MΩ	>500	—	>500	—

ность получения тех же высоких значений электрических свойств, которые указывают для серебрёных конденсаторов иностранные фирмы. Серебрёные конденсаторы изготовляют с номинальным значением емкости от 10...20 μμF до 2000...3000 μμF. При малых значениях емкости, ниже 200 μμF,



Фиг. 62. Слюдяной серебрёный конденсатор в керамическом корпусе: 300 μμF; 500 V

с ними теперь успешно конкурируют высокочастотные керамические конденсаторы.

Некоторые иностранные фирмы изготовляют слюдяные конденсаторы путем намотки из длинных полосок слюды и фольги, как бумажные конденсаторы малой емкости. В последних образцах намотанных слюдяных конденсаторов вместо фольги применяют двухстороннее серебрение одной из полосок слюды; вторая полоска служит изоляцией, предотвращающей замыкание обкладок при сворачивании серебрёной полоски. После намотки конденсатор помещают в изоляционную трубку и заливают с торцов компаундом.

В конденсаторе емкостью 5000 μμF длина полосок слюды составляет 200 mm. Намотанные конденсаторы изготовляют с номинальной емкостью от нескольких μμF до нескольких тысяч μμF. Фирма „Электрика" указывает для этих конденсаторов следующие характеристики:

допускаемое отклонение емкости от номинала	±20%
рабочее напряжение постоянного тока	650 V
„ „ переменного тока	400 V
испытательное напряжение постоянного тока .	2000 V
тангенс угла потерь	0,0005...0,0015

Температурный коэфициент и стабильность емкости у таких конденсаторов хуже, чем у обычных серебрёных, так как вторая слюдяная обкладка и воздушные зазоры образуют значительную паразитную емкость, ухудшающую характеристики конденсатора.

Преимуществами намотанных слюдяных конденсаторов являются уменьшенные размеры и простота конструкции;

недостаток — необходимость применять для их изготовления слюду очень больших размеров, дорогую и весьма дефицитную.

Этот недостаток исключает возможность широкого применения слюдяных намотанных конденсаторов.

§ 38. Серные конденсаторы

Сера представляет собой элемент, довольно широко встречающийся в природе как в самородном виде, так и в виде многочисленных соединений (сульфидные руды железа и меди, гипс и т. д.). Плотность серы при +20°C равна 2,08 G/cm³; температура плавления ромбической формы серы 112,8°C ± 0,2°C. При расплавлении сера заметно увеличивает объем: при +120° C ее плотность падает до 1,81 G/cm³, т. е. на 13%.

При температуре +160...170° C сера заметно густеет, но при дальнейшем повышении температуры до +200...250° C снова становится жидкой [80]. Электрические свойства серы достаточно высоки, чтобы сделать возможным ее использование в конденсаторостроении: $\varepsilon = 3{,}8...4{,}2$; $\alpha_t^\varepsilon = -32 \cdot 10^{-6}$ на 1°C; $\rho_v > 10^{16}$ $\Omega \cdot$cm и $\operatorname{tg}\delta = 2...3 \cdot 10^{-4}$ при радиочастотах. Американские фирмы применили серу в качестве диэлектрика в коротковолновых конденсаторах с высоким рабочим напряжением.

Серный конденсатор представляет собой цилиндрический конденсатор, в котором зазор между двумя металлическими цилиндрами залит серой. По сообщению фирмы Аэровокс [81], изготовленные ею серные конденсаторы имеют диаметр 51 mm и высоту 50...65 mm; при рабочем напряжении 10 $kV_{эфф}$ номинальная емкость составляет от 10 до 25 μμF, а при напряжении 5 $kV_{эфф}$ до 50 μμF.

При температуре +60°C допускаемое значение реактивной мощности для таких конденсаторов составляет: при 300 kHz—1,5 kVAR, при 1 MHz—5 kVAR и при 3 MHz—15 kVAR. Это дает значение удельного объема при частоте 3 MHz равное 9 cm³/kVAR.

В СССР разработаны опытные образцы серных конденсаторов с реактивной мощностью 25...50 kVAR и испытательным напряжением 7...10 kV, рассчитанные на работу при высокой частоте (до 10 MHz).

§ 39. Фарфоровые конденсаторы

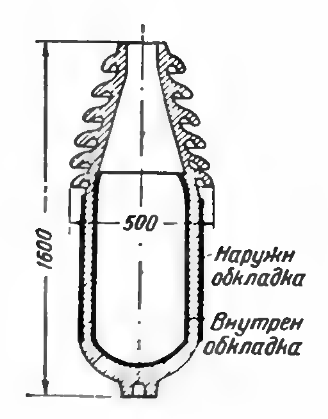
Среди всех керамических материалов фарфор первым начал применяться в электроизоляционной технике.

Название „керамические материалы", происходящее от греческого названия глины, обычно относят к глиносодер-

жащим материалам, но в последнее время под этим термином подразумевают и такие материалы, которые имеют общую технологию с глиносодержащими и сходство с последними по некоторым свойствам, хотя могут и не содержать в своем составе глины.

Высоковольтный фарфор имеет следующий средний состав: каолин (белая глина) 50%, полевой шпат 25%, кварц 25%. Для улучшения обрабатываемости фарфоровой массы в ее состав часто вводят до 10...15% пластичной глины за счет соответствующего снижения содержания каолина.

Каолин и глину разводят в воде и смешивают с размолотыми в тонкий порошок кварцем и шпатом. В зависимости от содержания в ней влажности полученная смесь может иметь вид жидкости, пластичного теста или сухого порошка.



Фиг. 63. Высоковольтный фарфоровый конденсатор

Придать нужную форму фарфоровому изделию можно одним из следующих основных методов:

1. Отливкой жидкой массы в гипсовую форму. За счет поглощения воды гипсом на поверхности формы осаживается слой отвердевающей массы; после получения слоя нужной толщины остаток жидкой массы сливают из формы.

2. Формованием пластичного теста путем продавливания его через мундштук (изготовление трубок) или вдавливания в форму.

3. Прессованием изделий из сухого порошка в металлических прессформах при большом удельном давлении.

Полученные тем или иным методом заготовки сначала сушат, а затем обжигают при высокой температуре.

В процессе обжига происходит усадка, достигающая 15...20%, что затрудняет получение точных размеров фарфорового (и вообще керамического) изделия.

Некоторые даные о свойствах фарфора приведены в табл. 7.

В электроизоляционной технике фарфор нашел себе ответственное применение в качестве основного диэлектрика для изоляции устройств высокого напряжения, особенно работающих на открытом воздухе (линейные изоляторы, бушинги и т. д.). В конденсаторостроении фарфор был использован для изготовления высоковольтных конденсаторов связи, непосредственно приключаемых к линиям передач высокого напряжения [82]. Устройство фарфорового конденсатора фирмы Телефункен показано на фиг. 63.

Таблица 7

Свойства керамических материалов

Название материала	γ G/cm³	ε	$\alpha_\varepsilon \cdot 10^6$ на 1°C	$tg\delta \cdot 10^4$ при 1MHz	$E_{пр}$ $\frac{kV}{mm}$ при 50 Hz	Коэф. линейн. расшир. 10^6	Временное сопротивление kG/cm²	
							сжатию	изгибу
Фарфор	2,3...2,4	6	+600...800	40...80	25	3...6	3000...5000	600...800
Стеатит	2,5...2,8	6,5	+120	15...20	20...30	6...7	4500...6000	1200...1400
Айсолантайт (США)	2,5	5,5...6,5	+120...160	25...35	10	7	—	1200...1500
Калит (Германия)	2,6...2,8	6,5	+150	4	35...45	7,8	—	1400...1600
Калан	—	6,6	+140	3,2	35	—	—	—
Ультракалан (Германия) . . .	2,7...2,8	7,1	+100...200	3	35...45	8,6	—	1600
Фреквента „ . . .	—	5,5...6	+100	5	—	—	—	—
Конденса N „ . . .	3,7	40	—380	8	15...20	6,7	5000	1500
Конденса C „ . . .	3,9	80	—720	6	10	7,3	3000	1040
Керафар R „ . .	—	80	—700	8	—	—	—	—
Керафар S „ . . .	—	70	—600	10	—	—	—	—
Керафар T „ . . .	—	45	—600	0.5	—	—	—	—
Керафар U „ . . .	—	55	—700	0,3	—	—	—	—
Темпа N „ . . .	—	22,5	—300	13	—	—	—	—
Керафар V „ . . .	—	19	—100	10...15	—	—	—	—
Темпа S „ . . .	—	14	+40	1	—	—	—	—

7 Реш. 5682

Диаконд	—	17	+30	1	—	—	—	—
Альсимаг 196 (США)	2,7	6	+140	8	9,6	6,3	5950	—
Альсимаг 211 (США)	2,7	5,8	+120	2	9,6	7,3	4550	—
„ 190	4,0	85	—680	6...10	4...8	7,1	5000...6000	1100...1250
„ 192	4,0	85	—680	6...10	4...8	7,3	5000...6000	1100...1250
Новый материал (титанат бария)	—	>1000	—	250	1...2	—	—	—
Радиофарфор (СССР) . . .	2,5	6,5	+150...300	20...35	20...25	3,7	—	600...1200
Ультрафарфор	2,8	6,5	+60...100	3	20	—	—	1000...1200
Алюминоксид	3,8	12	+120...140	3	10...15	7	—	1200...2000
Тиконд	3,9	80...90	—700	6...30	8...12	—	6000	400
Тидол	—	60...80	—1000	6...8	15	—	5000	1200...1500
Тиомаг	3,6	12	+40	3	10	—	—	1200...1400
Зил	—	14	+70	3	—	—	—	—
Тиглин А	—	12,5	±10...30	5,6	—	—	—	1000
„ М	—	14	±10...30	3	—	—	—	1000
„ К	—	10	±10...30	10...12	—	—	—	1000
Тимаг	—	16	±20	2...8	25	—	—	1200

Обкладки нанесены на фарфор путем распыления металла методом Шоопа. Такие конденсаторы имеют следующие характеристики [83]:

номинальная емкость	1100 и 2200 μμF
допускаемое отклонение емкости от номинала	±5%
температурный коэфициент емкости	+0,06...0,08% на 1°C
тангенс угла потерь	0,015...0,020
рабочее напряжение (50 Hz)	35 и 60 kV $_{эфф}$
испытательное напряжение	97 и 163 kV
вес	около 200 kG

Основными недостатками фарфоровых конденсаторов являлись высокие значения tgδ и температурного коэфициента емкости и недостаточно высокая импульсная прочность. В настоящее время эти конденсаторы вытеснены высоковольтными бумажно-масляными конденсаторами специальной конструкции.

§ 40. Высокочастотная керамика

Большой угол потерь и резкая зависимость его от температуры, характерная для фарфора, препятствовали применению этого диэлектрика при высоких частотах. В поисках материалов, подобных фарфору по физическим свойствам и технологии, но обладающих малым углом потерь, современная изоляционная техника разработала ряд новых материалов, отличающихся от фарфора своим составом и обладающих малым углом потерь (табл. 7).

Эти материалы известны под общим названием „высокочастотной керамики". Современное конденсаторостроение с успехом применило ряд материалов этой группы для изготовления высокочастотных конденсаторов, в основном малой емкости. Это обусловлено тем, что при малой емкости меньше сказывается отрицательная черта всякой керамики: трудность получения малых значений толщины (обычно минимум 0,5...1 mm, в особых случаях 0,2—0,3 mm) [84—88].

Особенностями керамических высокочастотных конденсаторов являются: высокая стабильность емкости во времени, линейность изменения емкости с температурой, простота конструкции и легкость получения малого отклонения емкости от номинала.

Ряд сортов керамики позволяет изготовить конденсаторы с очень малым углом потерь и очень малым температурным коэфициентом емкости α_t. Кроме того имеется возможность получать заданные значения α_t в широких пределах от —700...1000 до +100...150·10^{-6} на 1°C.

В Германии применяют для изготовления конденсаторов керамику трех основных типов:

1) материалы на основе силиката магния: калит, калан, ультракалан, фреквента и т. д. Эти материалы отличаются малым углом потерь и относительно небольшой диэлектрической проницаемостью ε, того же порядка, как у фарфора. Температурный коэфициент ε меньше, чем у фарфора, но относительно велик; имеет положительное значение.

2) Материалы на основе окиси титана: конденса и керафар. Эти материалы отличаются резко увеличенной ε, необычной для твердых диэлектриков. Угол потерь у них выше, чем у материалов первой группы, но может быть получен относительно небольшим. Температурный коэфициент ε велик и имеет отрицательное значение. Это позволяет путем параллельного соединения конденсаторов, изготовленных из материала первой и из материала второй групп, получить конденсатор с практически нулевым или наперед заданным температурным коэфициентом емкости (керамические компенсированные конденсаторы).

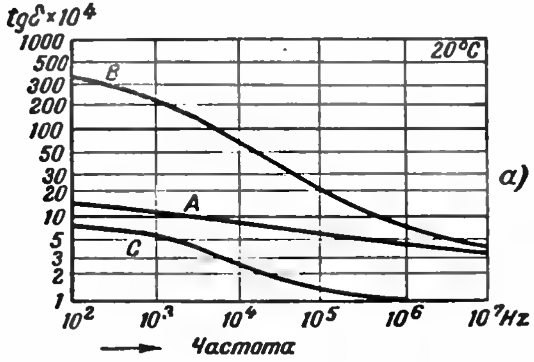
3) Материалы на основе титаната магния: темпа и диаконд. Эти материалы отличаются очень малым значением температурного коэфициента ε и малым углом потерь. Диэлектрическая проницаемость их ниже, чем у материалов второй группы, но все же относительно велика ($\varepsilon = 12...17$).

Диэлектрическая проницаемость ε высокочастотных керамических материалов линейно изменяется с температурой, увеличиваясь или уменьшаясь при повышении последней в соответствии со знаком температурного коэфициента. При повышении частоты ε всех этих материалов несколько уменьшается [89]. При переходе от частоты 10^3 Hz к 10^6 Hz материалы первой и третьей групп уменьшают ε на 0,3%; материалы второй группы при большом содержании TiO_2 — на 3%, а при пониженном содержании TiO_2 ($\varepsilon = 40...50$) — на 1,5%.

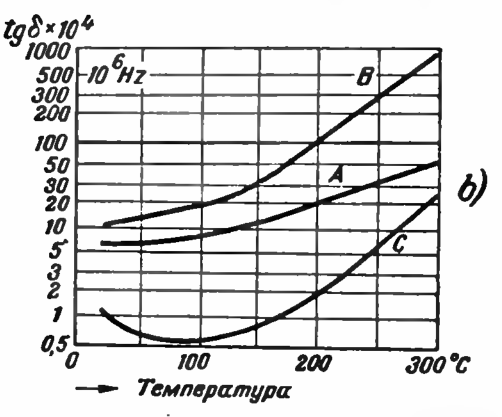
Угол потерь всех керамических материалов уменьшается при повышении частоты, особенно резко у материалов второй группы (фиг. 64); при повышении температуры угол потерь возрастает также особенно резко в случае материалов второй группы с большим содержанием TiO_2. Поэтому материалы этой группы менее пригодны для изготовления конденсаторов, рассчитаниых на большую реактивную мощность при высокой частоте.

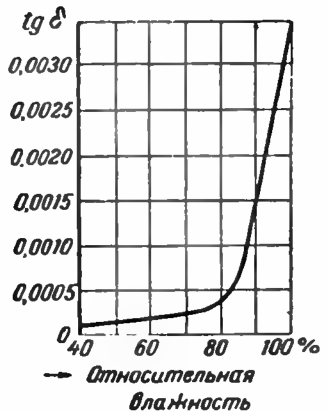
В условиях повышенной влажности, вследствие адсорбции влаги на поверхности керамики, угол потерь керамических конденсаторов резко возрастает. Покрытие конденсатора лаком не предохраняет его от действия влажности (фиг. 65); более того, пленка лака замедляет восстановление нормального значения $tg\delta$ при снижении влажности до нормального значения.

Американское и английское конденсаторостроение применяет керамические материалы, аналогичные германской высокочастотной керамике, позволяющие получить любое значение α_t в пределах от —680 до +120·10⁻⁶ на 1°C [87—91].



Кроме того, по последним данным [8а; 92а] разработан новый керамический материал с небывало большим значением





Фиг. 64. Зависимость угла потерь высокочастотных керамических материалов от частоты (*a*) и от температуры (*b*) (Хандрек):

A—материал на основе силиката магния; *B*—материал на основе окиси титана; *C*—материал на основе титаната магния

Фиг. 65. Зависимость угла потерь лакированного керамического конденсатора от влажности воздуха (Хандрек)

диэлектрической проницаемости: $\varepsilon > 1000$. Для этого материала характерно высокое значение угла потерь: $tg\delta = 0{,}0250$. Этот материал изготовляется на основе титаната бария.

В СССР работы по высокочастотной керамике ведутся уже на протяжении ряда лет [92]. В результате этих работ создана рецептура и технология отечественных керамических материалов (табл. 7); тиконд и тидол эквивалентны иностранным титаносодержащим материалам второй группы, а тимаг, тиглин, зил — эквивалентны материалам третьей группы [92а; 92б]. В качестве материалов первой группы могут применяться радиофарфор и ультрафарфор, получен-

ные улучшением фарфора специальными присадками, и алюминоксид — материал, представляющий собой высокоглиноземистую массу (Al_2O_3). Недостатком алюминоксида является резко повышенная температура обжига (1700° C), затрудняющая технологию. В производстве освоен материал „керамит", представляющий собой глиноземистую массу с увеличенным содержанием глины. У этого материала сниженная температура обжига (1460° C) достигнута за счет заметного ухудшения угла потерь ($tg\delta = 0{,}002...0{,}003$).

В настоящее время в СССР ведутся работы по освоению керамических масс на основе талька (силиката магния); получены также первые удачные образцы керамических материалов на основе титаната бария с диэлектрической проницаемостью выше 1000 (тибар; барикон).

§ 41. Высокочастотные керамические конденсаторы

Конструкция керамических конденсаторов, изготовляемых иностранными фирмами для применения в радиоприемной аппаратуре, приведена на фиг. 66. В качестве обкладок используют слой серебра, нанесенный на поверхность керамики методом вжигания (§ 32). Обычно конденсаторы покрывают лаком, хотя это и не обеспечивает их надежной влагостойкости. Для работы в условиях высокой влажности применяют специальную конструкцию: цилиндрический конденсатор помещают в керамическую трубку, запаянную с торцов (концы трубки серебрят и заливают легкоплавким сплавом).

Рабочее напряжение конденсаторов 500 V, при испытательном напряжении 1500 V (50 Hz). Пределы номинальной емкости конденсатора зависят от его конструкции и типа керамической массы, из которой он изготовлен, и могут составлять для обычных масс от 1...5 до 1000...2000 μμF. Конденсаторы, изготовленные из специальной массы на основе титаната бария, могут иметь емкость до 100 000 μμF.

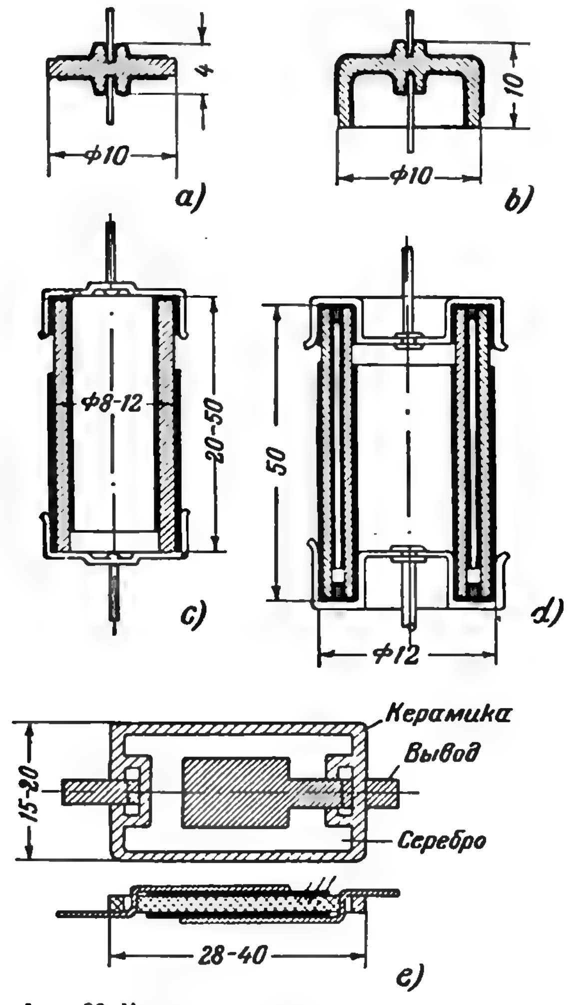
Обычная точность подгонки емкости ±5 и ±10% (±1 μμF) достигается сошлифовкой части серебряного слоя (обкладки); специальный допуск по емкости ±0,5% (±0,25 μμF) достигается отбором конденсаторов из больших партий, при разбраковке их по емкости.

Наряду с конденсаторами постоянной емкости изготовляют и полупеременные керамические конденсаторы (фиг. 67).

Соприкасающиеся поверхности статора и ротора подвергают оптической шлифовке. Статор обычно изготовляют из материала с малой ε, а ротор из материала с высокой или повышенной ε. Фирма Гешо изготовляет полупеременные

конденсаторы со следующими значениями начальной (C_o) и регулируемой ($C_{рег}$) емкостей:

материал ротора: конденса C_o=3...20 μμF; $C_{рег}$=17...80 μμF,
" " темпа C_o=1...6 μμF; $C_{рег}$=6...20 μμF.



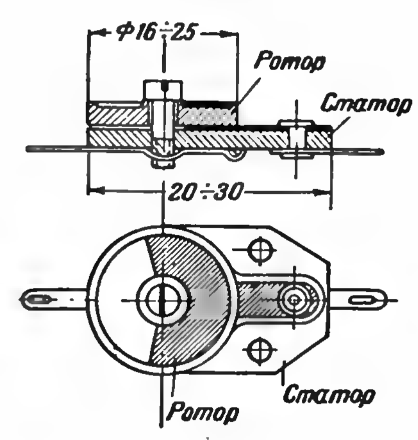
Фиг. 66. Конструкция керамических конденсаторов, применяемых в радиоаппаратуре (фирма Гешо):

a—шайба (1...50 μμF); *b*—чашечка (3,5...100 μμF); *c*—трубка (5...2000 μμF); *d*—двойная трубка (220...600 μμF); *e*—пластинка (25...360 μμF)

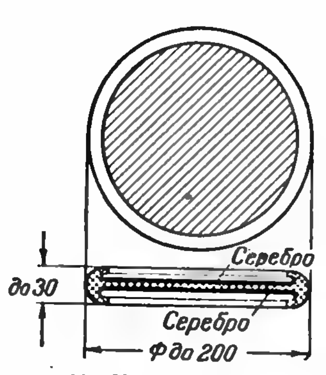
Фирма Эри изготовляет аналогичные конденсаторы со следующими пределами изменения емкости: 4...30; 7...45; 8...75 и 10...110 μμF при габаритных размерах от 22×33

до 32×48 mm. По величине температурного коэфициента емкости американские триммеры разделяются на три типа: 1) $\alpha_t < 0{,}01\%$ на 1° C; 2) $\alpha_t = -0{,}03\%$ на 1° C; 3) $\alpha_t = -0{,}05\%$ на 1° C.

Контурные конденсаторы изготовляют из керамики с особо малым $\operatorname{tg}\delta$ (калит, темпа *S*). Конденсаторы имеют форму трубок диаметром 12 mm и длиной 30...80 mm, для нагрузки до 1...2 kVAR высокой частоты при $U_{исп}=2$ kV (50 Hz), или форму дисков (фиг. 68) для нагрузки до 40 kVAR при $U_{исп}$ до 20 kV (50 Hz). При изготовлении контурных керамических конденсаторов большое значение имеет величина



Фиг. 67. Полупеременный керамический конденсатор



Фиг. 68. Контурный керамический конденсатор в форме диска; реактивная мощность до 40 kVAR

ионизирующего напряжения U_o и зависимость последнего от частоты. Эту зависимость можно выразить следующим уравнением [93]:

$$U_{o_2} = U_{o_1} - \operatorname{tg}\beta(\lg f_2 - \lg f_1), \qquad (61)$$

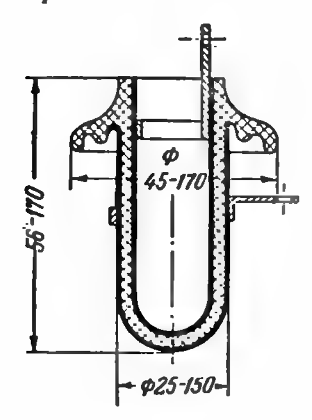
где U_{o_1} — ионизирующее напряжение при частоте f_1, а U_{o_2} — при f_2; если U_o выражено в V, а f — в Hz, то $\operatorname{tg}\beta = 550$.

Контурные керамические конденсаторы большой мощности изготовляют путем соединения отдельных трубчатых или дисковых конденсаторов в последовательно-параллельные группы.

При этом нагрузку на каждый отдельный конденсатор несколько снижают, так как в группе условия теплоотвода хуже, чем у индивидуально работающего конденсатора.

Блокировочные и анодно-разделительные конденсаторы изготовляют из титаносодержащих материалов с высокой ε

(конденса, керафар). Для этих конденсаторов увеличенное значение tgδ материалов этой группы не опасно, так как они подвергаются воздействию постоянного напряжения с небольшой составляющей высокой частоты. Конденсаторы изготовляют подвесного типа (фиг. 69), называемого „горшковым", с номинальной емкостью 250...10000 μμF при $U_{раб}$=5 kV и с емкостью 750...3000 μμF при $U_{раб}$=12 kV (постоянный ток). Испытательное напряжение берут равным удвоенному рабочему.



Фиг. 69. Анодно-разделительный керамический конденсатор горшкового типа, емкость до 10000 μμF при рабочем напряжении 5 kV

Тангенс угла потерь таких конденсаторов при частоте 1 MHz не превышает 0,002.

В СССР опытно-серийное производство керамических конденсаторов для радиоприемной аппаратуры освоено, хотя масштабы его еще недостаточны. Успешно отрабатываются также образцы более мощных керамических конденсаторов для радиопередающей аппаратуры [94—96].

Керамические конденсаторы малой емкости могут успешно применяться вместо слюдяных конденсаторов при значениях емкости до 200...300 μμF; качество этих конденсаторов в отношении стабильности емкости даже выше, чем у слюдяных конденсаторов типа „Стабиль". Для применения в радиоприемной аппаратуре очень удобны керамические триммеры, которые также начали изготовлять наши заводы [96а]. После освоения в производстве керамических конденсаторов для радиопередатчиков такие конденсаторы в тех случаях, где требуется повышенное значение рабочего напряжения и пониженная емкость, смогут успешно конкурировать со слюдяными контурными конденсаторами, будучи в 2...3 раза дешевле последних.

Глава IV

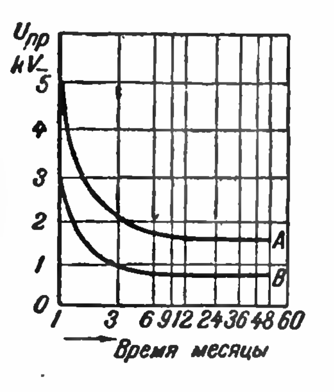
КОНДЕНСАТОРЫ С ТВЕРДЫМ ОРГАНИЧЕСКИМ ДИЭЛЕКТРИКОМ

§ 42. Особенности конденсаторов с органическим диэлектриком

Основным твердым органическим диэлектриком, широко применяемым в конденсаторостроении, является конденсаторная бумага. Искусственные органические пленки (целлон

стирофлекс, лектрофильм) в этой области техники пока еще имеют ограниченное применение. Диэлектрики данного типа можно применять в виде длинных лент малой толщины (от 6...12 до 25...50 микрон), намотанных в рулоны.

Применяя рулонные материалы, можно изготовлять конденсаторные секции намоткой на специальных намоточных станках, что резко удешевляет производство по сравнению с ручной сборкой секций. Поэтому эти материалы очень удобны для изготовления низковольтных конденсаторов большой емкости (от десятых долей μF до нескольких μF), требующих относительно большой площади обкладок. Применяя тщательную сушку и пропитку бумаги, можно изготовлять также и высоковольтные бумажные конденсаторы, вполне удовлетворительно работающие не только при постоянном токе, но и при технической частоте, а при пониженных нагрузках даже при частотах до 10^4 Hz.



Фиг. 70. Зависимость пробивного напряжения бумажных конденсаторов от времени воздействия напряжения:

„кривые жизни" (Бейли), *A*—конденсаторы, пропитанные маслом; *B*—конденсаторы, пропитанные парафином

В отличие от неорганических диэлектриков органические вещества имеют пониженную теплопроводность, низкую теплостойкость и малую химическую стойкость. Поэтому для органических диэлектриков характерен процесс „старения" — снижение их электрической прочности со временем, при длительном воздействии электрического поля, особенно при повышенной температуре. Этот процесс обусловлен происходящими в диэлектрике физико-химическими процессами (окисление, химическое разложение, связанное с выделением проводящих или полупроводящих веществ и т. д.).

Вследствие существования явления старения рабочее напряжение конденсаторов с органическим диэлектриком приходится брать резко пониженным по сравнению с пробивным напряжением, полученным при быстром испытании. Для уменьшения больших коэфициентов запаса, удорожающих конденсаторы, большое внимание уделяют изучению поведения конденсаторов в эксплоатации и снимают „кривые жизни" конденсаторов: $U_{пр} = f(\tau)$ для больших промежутков времени (фиг. 70).

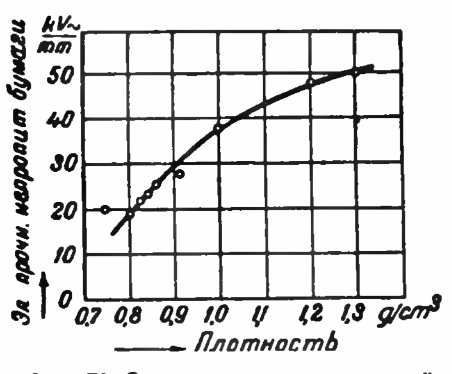
Серьезным недостатком конденсаторов с органическим диэлектриком является также их повышенный угол потерь по сравнению с доброкачественными неорганическими ди-

электриками (слюда, керамика). Среди конденсаторов с органическим диэлектриком малым $tg\delta$ обладают только стирофлексные конденсаторы.

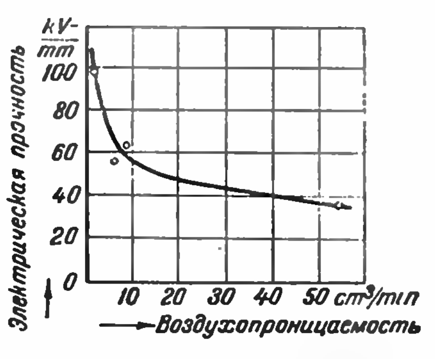
Конденсаторы с органическим диэлектриком уступают также слюдяным и керамическим конденсаторам в отношении меньшей стабильности емкости и более резко выраженной зависимости последней от частоты и температуры.

§ 43. Конденсаторная бумага

Для изготовления бумажных конденсаторов применяется специальная бумага, отличающаяся весьма малой толщиной и высокой плотностью и поставляемая в виде рулонов (бобин) с шириной, указанной при заказе.



Фиг. 71. Зависимость электрической прочности непропитанной конденсаторной бумаги от ее плотности (Ренне)



Фиг. 72. Зависимость электрической прочности парафинированных конденсаторов от воздухопроницаемости бумаги (Ренне)

Удельный объем бумажного конденсатора примерно прямо пропорционален квадрату толщины бумаги; поэтому при изготовлении низковольтных конденсаторов необходимо применять возможно более тонкую бумагу. Нижний предел толщины конденсаторной бумаги, вырабатываемой в США, равен 7...7,5 μ; европейские фирмы вырабатывают бумагу даже 6...6,5 μ. В СССР бумага толщиной 7...8 μ выпускается в виде опытных партий. Обычная толщина конденсаторной бумаги 9...11 μ; верхний предел толщины бумаги 20...25 μ. Обычный допуск по толщине бумаги ± 10%. С повышением плотности бумаги повышается ее электрическая прочность (фиг. 71); европейские фирмы добились величины $\gamma = 1,2...1,3$ G/cm³, в то время как у нас и в США $\gamma = 0,95...1,10$ G/cm³. Увеличение плотности несколько повышает $tg\delta$ и может изменять величину и знак температурного коэфициента емкости бумажного-

конденсатора (§ 48, табл. 10), так как с изменением γ меняется количество впитанной пропиточной массы. Повышение воздухопроницаемости бумаги дает снижение пробивного напряжения конденсатора (фиг. 72); доброкачественная бумага должна иметь воздухопроницаемость не выше 5...7 cm^3/min. Зольность конденсаторной бумаги должна быть не выше 0,5%, так как повышение зольности приводит к ухудшению электрической прочности бумаги и изготовленных из нее конденсаторов [101]. Доброкачественная бумага должна иметь минимальное количество структурных дефектов [102] и минимальное содержание проводящих частиц [103].

По американским нормам количество проводящих частиц не должно превышать 110 штук на 1 m^2. Эти же нормы требуют отсутствия в бумаге определимых количеств сульфатов и хлоридов и нейтрального характера водной вы-

Фиг. 73. Молекула клетчатки

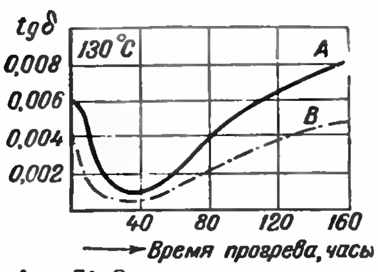
тяжки из бумаги (допускается щелочность не свыше 0,2 mg на 1 g бумаги).

Временное сопротивление разрыву вдоль длины ленты у доброкачественной конденсаторной бумаги составляет от 800 до 1200 kG/cm^2.

Раньше конденсаторную бумагу изготовляли только из отборного льняного тряпья; теперь применяют также и более дешевую сульфатцеллюлозную бумагу (крафтбумагу). Эту бумагу по ее светлокоричневой окраске легко отличить от белой тряпичной бумаги. По общим характеристикам оба сорта бумаги практически не отличаются друг от друга [100, 104]; по теплостойкости современная целлюлозная бумага лучше тряпичной [105—107].

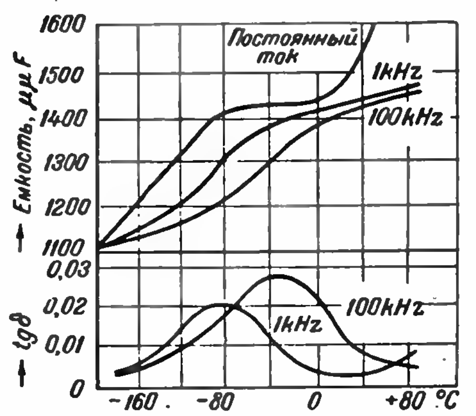
Основой растительных волокон, из которых изготовляется бумага, является клетчатка $(C_6H_{10}O_5)_n$, относящаяся к классу сложных углеводов (фиг. 73). Цепочечное строение молекулы клетчатки обусловливает вытянутую форму волокон. При повышенной температуре и при доступе кислорода клетчатка окисляется с образованием органических кислот; продукты окисления каталитически ускоряют этот процесс. При длительном нагреве бумага желтеет, снижается ее механическая прочность и ухудшаются ее

электрические свойства (фиг. 74). Окисление бумаги делается заметным уже при нагреве до 110...120° С; при температуре 150...160° С начинается процесс прямого термического разложения с выделением газообразных и жидких продуктов и свободного углерода; этот процесс происходит интенсивно даже под вакуумом [108]. Небольшая степень окисления не отражается вредно на электрических свойствах конденсаторной бумаги; поэтому для этой бумаги можно допускать следующие режимы нагрева.



Фиг. 74. Зависимость угла потерь непропитанных бумажных конденсаторов от времени прогрева при 130° С на воздухе (Ренне)

А—тряпичная бумага; *В*—целлюлозная бумага



Фиг. 75. Зависимость емкости и угла потерь образца сухой непропитанной бумаги от температуры (Морган)

В процессе сушки конденсаторов при хорошем вакууме: до 130° С в течение нескольких десятков часов и до 140° С в течение нескольких часов.

В процессе пропитки конденсаторов, погруженных в пропиточную массу, до 155...165° С в течение нескольких часов.

В процессе эксплоатации конденсаторов, в зависимости от типа пропиточной массы, до 70...100° С в течение длительного времени.

По последним рекламным данным, американские фирмы допускают для специальных бумажных конденсаторов длительную работу при температурах до 115°С.

Воздушносухая бумага, помимо клетчатки, содержит еще воздух и воду. Для бумаги обычной плотности соотношение между этими тремя составляющими: 65, 30 и 5% по объему. Для изготовления бумажных конденсаторов с рабочим напряжением 50...100 kV и выше вместо конденсаторной бумаги применяют кабельную, так как при большой суммарной толщине диэлектрика очень малая толщина конденсаторной бумаги неудобна.

Клетчатка относится к числу диэлектриков, в которых имеет место дипольная поляризация в твердом состоянии; (§ 7) в клетчатке эта поляризация обусловлена поворотом гидроксильных групп OH относительно остальной части молекулы (фиг. 73). Поэтому в сухой бумаге в интервале температур от —40 до —80° С наблюдается дипольный максимум tgδ и происходит снижение диэлектрической проницаемости (фиг. 75).

§ 44. Пропиточные массы для бумажных конденсаторов

Для пропитки бумажных конденсаторов применяют массы трех типов:

твердые — воскообразные вещества,

полужидкие — вазелин, масляно-канифольный компаунд,

жидкие — масла.

Характеристики основных пропиточных масс, применяемых современным конденсаторостроением, приведены в табл. 8.

Применение твердых пропиточных масс позволяет упростить конструкцию и технологию изготовления конденсатора, но снижает его электрическую прочность по сравнению с конденсаторами, пропитанными жидкими или полужидкими массами (фиг. 70). Это объясняется значительной усадкой (до 15...20%) при застывании, свойственной воскообразным веществам, применяемым в качестве твердых масс; в результате усадки часть пор бумаги после пропитки оказывается незаполненной пропитывающим веществом, что дает снижение пробивного напряжения.

В настоящее время твердыми массами пропитывают только те конденсаторы, которые предназначаются для работы при постоянном или выпрямленном напряжении, или же подвергаются воздействию малых напряжений переменного тока.

Применение жидких и полужидких масс требует герметизации конструкции конденсатора и усложняет технологию.

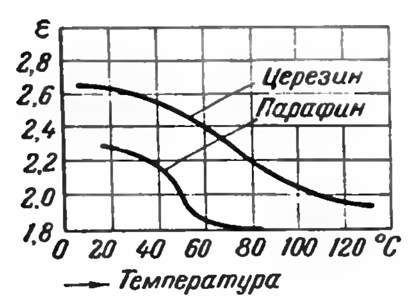
Помимо усложнения процесса сушки и пропитки конденсаторов в этом случае требуется применять предварительную очистку и сушку пропиточной массы. Вместе с тем бумажно-масляные и бумажно-вазелиновые конденсаторы имеют резко повышенную электрическую прочность и пониженный tgδ. Пропитку жидкими массами применяют при изготовлении конденсаторов, предназначенных для работы в цепях сильного тока, и при изготовлении высоковольтных конденсаторов, даже применяемых при постоянном токе. В некоторых случаях бумажно-масляные конденсаторы применяют при повышенных частотах, до 10^4 Hz.

Таблица 8

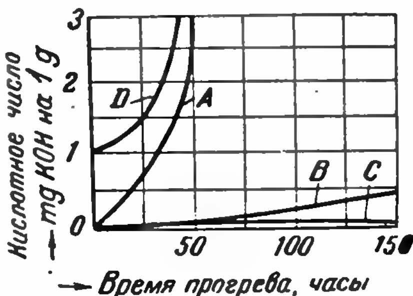
Характеристики пропиточных масс, применяемых в производстве бумажных конденсаторов

Тип массы	Название	Плотность, G/cm	Температура плавления или застывания, °C	ε	Угол потерь: $\operatorname{tg}\delta \cdot 10^4$	Угол потерь: при частоте f Hz	ρ_v $\Omega \cdot cm$	$E_{пр}$ $\frac{kV}{mm}$ при 50 Hz
Жидкая	Минеральное масло	0,86...0,89	— 40...45	2,1...2,2	1...5	50	$10^{14}...10^{15}$	25...30
„	Касторовое масло	0,95...0,97	— 15...17	4,7...5	100...200	50	$10^{10}...10^{12}$	20...25
„	Совол	1,50...1,52	+ 5...10	5...5,2	5...10	50	$10^{13}...10^{14}$	27...32
Полужидкая	Вазелин	0,83...0,88	+ 30...50	2...2,1	3...5	1000	$10^{15}...10^{17}$	20...25
Твердая	Парафин	0,8...0,92	+ 50...55	2...2,2	3...7	1000	$10^{15}...10^{18}$	15...20
„	Церезин	0,88...0,95	+ 65...80	2,1...2,6	3...5	1000	$10^{16}...10^{18}$	15...25
„	Олеовакс	0,97...0,99	+ 75...80	10...20	700...1500	1000	$10^{13}...10^{15}$	5...8
„	Галовакс	1,5...1,6	+ 90...130	4,5...5,5	5...20	1000	$10^{13}...10^{14}$	6...10

Наиболее распространенная твердая пропиточая масса — **п а р а ф и н** — является одним из продуктов переработки нефти. Этот продукт представляет собой смесь твердых предельных углеводородов C_nH_{2n+2}, имеющих вытянутую слаборазветвленную цепь углеродных атомов. При хорошей очистке от непредельных компонентов и остатков масел имеет белый цвет. Поскольку для очистки применяют серную кислоту, парафин надо проверять на наличие минеральной кислотности; для пропитки конденсаторов должен приме-



Фиг. 76. Зависимость диэлектрической проницаемости парафина и церезина от температуры (Рение)



Фиг. 77. Зависимость кислотности воскообразных веществ от времени прогрева:

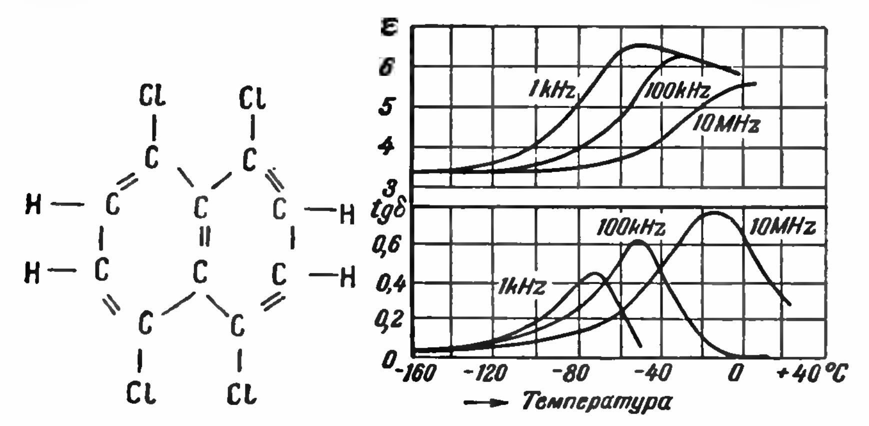
A — парафин при 150° С; *B* — церезин при 170° С; *C* — галовакс при 185° С (Вальтер); *D* — олеовакс при 150° С (Рение)

няться парафин с нейтральной реакцией. Молекулы парафина не имеют дипольного момента, поэтому угол потерь его весьма мал и диэлектрическая проницаемость невелика. Хорошо очищенный белый парафин имеет высокое удельное сопротивление. При нагревании парафина наблюдается заметное снижение ε, особенно в интервале плавления (фиг. 76); это снижение соответствует уменьшению плотности парафина (§ 7). Недостатками парафина являются низкая точка плавления, малая величина ε и легкая окисляемость при нагреве [110]. Заметное возрастание кислотности парафина, сопровождающееся снижением удельного сопротивления и ростом $\operatorname{tg}\delta$, происходит уже после нагрева на воздухе в течение 10...20 часов при температуре 130...140°С (фиг. 77). Основное преимущество парафина, помимо высокого ρ_v и малого $\operatorname{tg}\delta$, это его низкая стоимость (менее 1 руб/кг).*

Ц е р е з и н, так же как и парафин, представляет собой смесь предельных углеводородов C_nH_{2n+2}; последние отличаются от углеводородов парафина более сильным разветвле-

* Во время войны в Германии наряду с обычным парафином применялся подобный ему по электрическим свойствам тугоплавкий синтетический парафин—„воск Z“ (точка плавления 100° С).

нием цепи углеродных атомов и большей величиной коэфициента *n*. Церезин получают путем очистки воскообразного минерала-озокерита (горный воск); цвет церезина оранжевый или светложелтый. Электрические свойства церезина близки к свойствам парафина; ε — немного повышена и менее резко снижается при нагреве (фиг. 76.) Преимуществами церезина являются повышенная температура плавления и повышенная стойкость против окисления при нагреве (фиг. 77). Стоимость церезина в 2...3 раза выше стоимости парафина. Твердый церезин (с повышенной точкой плавления) склонен при застывании



Фиг. 78. Молекула тетрахлорнафталина

Фиг. 79. Зависимость диэлектрической проницаемости и угла потерь галовакса от температуры (Морган и Иегер)

давать глубокие трещины и образовывать внутренние раковины, приводящие к снижению электрической прочности.

Г а л о в а к с (полихлорнафталин, нибрен нафтакс, сикейвакс) представляет собой синтетический продукт, полученный хлорированием ароматического углеводорода — нафталина $C_{10}H_8$ [111 — 112]. Галовакс является смесью продуктов разной степени хлорирования, преимущественно трихлорнафталина $C_{10}H_5Cl_8$ и тетрахлорнафталина $C_{10}H_4Cl_4$ (фиг. 78).

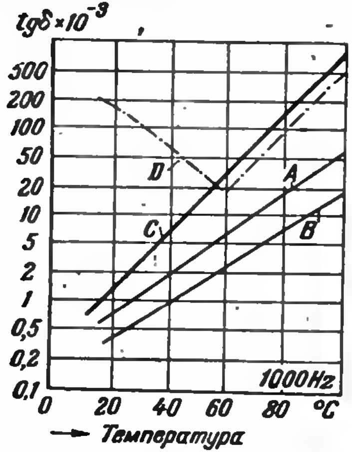
В процессе хлорирования образуется хлористый водород HCl, следы которого всегда присутствуют в галоваксе.

Среднее содержание связанного хлора в галоваксе составляет около 50%. Увеличение степени хлорирования повышает ε галовакса и его точку плавления.

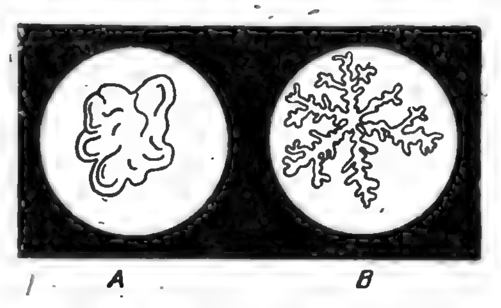
Галовакс обладает дипольной поляризацией в твердом состоянии за счет поворота атомов хлора по отношению к остальной части молекулы [113]. Поэтому, как и в случае клетчатки, для галовакса наблюдается в области температур ниже нуля дипольный максимум угла потерь, сопровождающийся снижением ε при понижении температуры (фиг. 79).

В области температур выше нуля ε линейно снижается с повышением температуры, причем это снижение менее значительно, чем снижение ε парафина и церезина в том же интервале температур. При переходе через температуру начала размягчения галовакса (на 20...30°С ниже точки плавления) наблюдается резкое возрастание ε за счет вступления в процесс поляризации остаточных молекул HCl, имеющих большой дипольный момент, но неподвижных при твердом состоянии галовакса.

Преимуществами галовакса являются: резко повышенная температура плавления и повышенная ε (более, чем в два раза выше, чем у парафина), меньшее изменение ε с температурой в области положительных температур и большая стойкость против



Фиг. 80. Зависимость угла потерь воскообразных веществ от температуры (Ренне):
A—парафин; B—церезин; C—галовакс; D—олеовакс

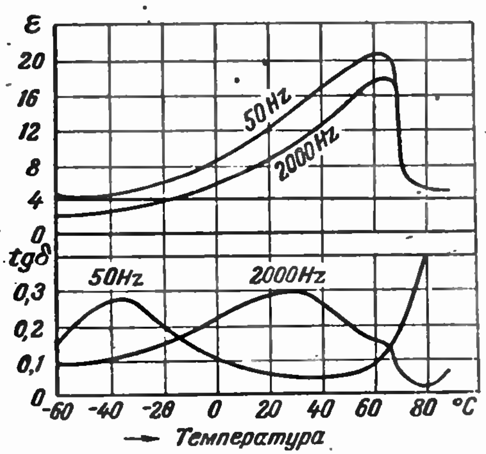


Фиг. 81. Микрозарисовки при увеличении 300 раз (Ренне):
A—кристаллик галовакса; B—кристаллик сплава галовакса с бензилцеллюлозой

окисления (рост кислотности не наблюдается при длительном нагреве при $t = 180...190^\circ$ С).

Основные недостатки галовакса: высокая стоимость (в 10 раз дороже парафина), повышенный удельный вес, пониженное ρ_v, увеличенный tgδ (фиг. 80) и наличие остаточной минеральной кислотности. Последнее приводит к ускоренному разрушению бумаги при нагреве ее в галоваксе при $t > 150^\circ$ С. Галовакс имеет пониженную электрическую прочность, обусловливающую снижение пробивного напряжения галоваксных конденсаторов на 25...50% по сравнению с парафинированными. Этот недостаток можно ослабить, добавляя к галоваксу 3...5% бензилцеллюлозы, что дает резкое изменение структуры (фиг. 81) и повышает механическую и электрическую прочность. Одновременно этим достигается уменьшение температурного коэфициента емкости конденсаторов [114].

При длительном воздействии постоянного напряжения при высокой рабочей температуре в бумажных галоваксных конденсаторах с алюминиевыми обкладками происходят коррозионные явления, вызывающие возрастание тока утечки и преждевременный выход конденсатора из строя. Это явление можно предотвратить, добавляя к галоваксу стабилизирующие примеси [115], например антрахинон в количестве до 0,5%. Относительная дороговизна галовакса ограничивает его применение теми случаями, когда бумажный конденсатор должен иметь повышенную теплостойкость и пониженный удельный объем (замена парафина галоваксом уменьшает объем конденсатора с заданной емкостью на 25...30%).



Фиг. 82. Зависимость диэлектрической проницаемости и угла потерь олеовакса от температуры (Вальтер, Инге, Трапбицкая)

При работе с галоваксом требуется усиленная вентиляция у рабочих мест, так как пары его вредны для здоровья.

Олеовакс — масляный воск (в США опалвакс — опаловый воск) — представляет собой новый тип воскообразного вещества с резко повышенной диэлектрической проницаемостью, который только недавно начали применять в конденсаторостроении. Олеовакс изготовляют путем гидрогенизации (насыщения водородом) касторового масла, причем в результате этого процесса получается твердый продукт с температурой плавления 75...80° С. Гидрогенизацию проводят в автоклаве при повышенной температуре и давлении 40 атмосфер, в присутствии солей Ni или Co, служащих катализатором. Готовый продукт должен быть отфильтрован для очистки от следов этих солей. Олеовакс отличается высокой ε (у отдельных образцов $\varepsilon = 25$), но имеет высокий $\operatorname{tg}\delta$ и пониженную электрическую прочность. Резко повышенная диэлектрическая проницаемость олеовакса обусловлена резко выраженной дипольной поляризацией, проявляющейся в твердом состоянии этого вещества. При переходе в жидкое состояние ε олеовакса резко падает.

При понижении температуры также происходит сильное снижение ε, сопровождающееся появлением дипольного максимума на кривой $\operatorname{tg}\delta = f(t)$ (фиг. 82).

Повышение частоты вызывает резкое уменьшение ε: при переходе от частоты 10^8 Hz к частоте 10^5 Hz олеовакс уменьшает величину ε в три раза [116; 117].

Длительный нагрев вызывает повышение кислотности олеовакса, сопровождаемое уменьшением ε и tgδ.

Применение олеовакса дает заметное уменьшение габарита конденсаторов; при замене парафина олеоваксом объем конденсатора снижается почти в 2 раза. Это дает большую экономию бумаги и фольги, компенсирующую повышенную стоимость олеовакса (в 7...8 раз дороже парафина).

Вместе с тем олеоваксные конденсаторы имеют резкую зависимость емкости от температуры и частоты, большой tgδ и пониженное пробивное напряжение, что ограничивает возможность их широкого использования.

Наиболее распространенной жидкой пропитывающей массой является минеральное масло. Для пропитки конденсаторов часто применяют обычное трансформаторное масло, но лучшие результаты дает применение специальных сортов масла, отвечающих определенным техническим требованиям конденсаторостроения [118, 119]. Минеральное масло получают как один из продуктов перегонки нефти; это масло представляет собой смесь жидких углеводородов, часто циклического строения: C_nH_{2n}. В очищенном виде масло имеет вид светложелтой жидкости с малой вязкостью. При хорошей очистке сухое минеральное масло имеет малый tgδ, высокое удельное сопротивление и достаточно высокую электрическую прочность. Стоимость этого масла низка (менее 1 *руб/кг*). Недостатками минерального масла являются: низкое значение диэлектрической проницаемости, легкая воспламеняемость и взрывоопасность и недостаточная химическая стабильность при воздействии электрического поля и повышенной температуры.

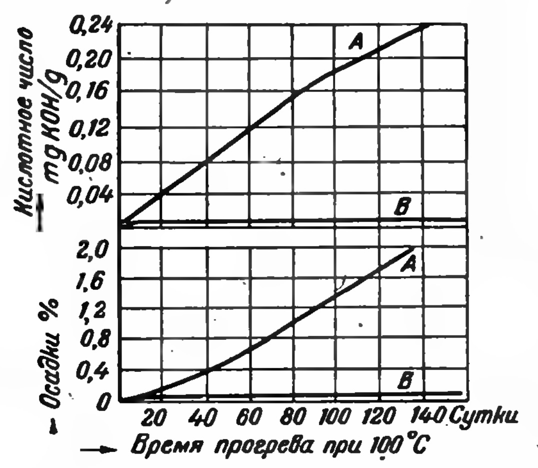
Действие повышенной напряженности поля приводит к полимеризации и конденсации масла с образованием воскоподобного твердого вещества, называемого „сыр" или „икс-воск", это вещество ухудшает теплопроводность и облегчает пробой пропитанной маслом бумаги. Некоторые сорта масла при воздействии электрического поля выделяют водород, что приводит к увеличению газовых включений в бумаге и возрастанию потерь на ионизацию. При нагревании масло легко окисляется и выделяет осадки (фиг. 83).

Масло является нейтральным диэлектриком (не содержит дипольных молекул); вследствие этого его ε мало изменяется с температурой (фиг. 85). При комнатной температуре угол потерь масла очень мал; при нагревании tgδ возрастает в соответствии с ростом проводимости.

По техническим условиям одного из наших заводов [119] доброкачественное масло для конденсаторов должно иметь

плотность при +20°C, равную 0,877 g/cm³; вязкость по Энглеру при +50°C, равную 1,73°; кислотность в пределах от 0,017 до 0,020 mg KOH на 1 g и количество осадков не более 0,2%.

Синтетическое масло — совол (пентахлордифенил, пиранол, инертин, ароклор, перминтол, диканол) — представ-



Фиг. 83. Зависимость кислотности и количества осадков в жидких диэлектриках от времени прогрева при 140°C (Андрианов и Сидорова):
A — минеральное масло; *B* — совол

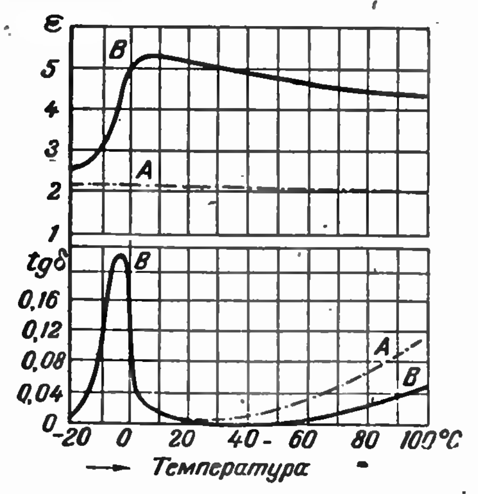
ляет собой жидкий продукт, полученный хлорированием ароматического углеводорода — дифенила $C_{12}H_{10}$ (фиг. 84).

```
      H       H           H       H
      |       |           |       |
      C ═════ C           C ═════ C
     /         \         /         \
H — C           C — C             C — H
     \\        //     \\          //
      C ───── C         C ───── C
      |       |         |       |
      H       H         H       H
```

Фиг. 84. Молекула дифенила

При хлорировании молекула дифенила присоединяет пять атомов хлора, замещающих атомы водорода; содержание связанного хлора в готовом продукте составляет около 50%. Для получения достаточно высоких электрических свойств продукт хлорирования должен быть тщательно

очищен адсорбентами [120—121]. При комнатной температуре очищенный совол имеет вид бесцветной жидкости с большой вязкостью. При нагревании вязкость совола быстро падает и уже при +80°C приближается к вязкости обычного минерального масла. При температурах выше 100°C совол легко впитывается в бумагу.



Фиг. 85. Зависимость диэлектрической проницаемости и угла потерь жидких диэлектриков от температуры (Андрианов и Сидорова)
A—минеральное масло; B—совол

В отличие от минерального масла совол является типичным дипольным диэлектриком, снижающим ε при застывании и обладающим резко выраженным дипольным максимумом tgδ (фиг. 85). Хорошо очищенный совол химически малоактивен; его воздействие на соприкасающиеся с ним металлы слабее, чем воздействие на них минерального масла. Так после прогрева металлических пластинок в жидком диэлектрике в течение 150 суток при +100°C потеря в весе этих пластинок составляет: алюминий в масле—1,79%, в соволе — 0,58%; медь в масле — 0,09%, в соволе — 0,04%; жесть в масле — 0,23%, в соволе — 0,02%. Хорошо очищенный совол при +90°C и 1 $\frac{kV}{mm}$ (50 Hz) должен иметь tgδ не более 0,010...0,020 [122].

Недостатками совола являются: высокая стоимость (в 15—20 раз дороже масла), повышениый удельный вес, раздражающее действие на слизистые оболочки (требующее применения специальных мер предосторожности при работе с соволом) и заметная зависимость ε от температуры (при температуре ниже нуля емкость соволовых конденсаторов снижается на 25%). Основные преимущества совола: повышенная ε, обеспечивающая при замене масла соволом повышение емкости на 50%; повышенная химическая стабильность (фиг. 83); негорючесть и взрывобезопасность. Эти преимущества обусловили широкое применение этой пропитывающей жидкости в американском конденсаторостроении, особенно в производстве сильноточных конденсаторов. В Европе применение этой жидкости было более ограничено. В СССР производство бумажно-соволовых

конденсаторов было начато перед войной; была показана целесообразность замены масла соволом в производстве статических конденсаторов, применяемых в технике сильных токов.

По последним американским данным [122 а], для пропитки бумажных конденсаторов, рассчитанных на работу в широком интервале температур (от —40 до +85°С), рекомендуется применять „специальный инертин", представляющий собой смесь пентахлордифенила с полихлорэтилбензолом. Эта смесь имеет несколько сниженную диэлектрическую проницаемость ($\varepsilon = 4...4{,}5$), но зато обеспечивает большую стабильность емкости конденсатора при низких температурах, чем в случае чистого пентахлордифенила. При пропитке соволом конденсаторов, применяемых в цепи постоянного тока при повышенной температуре, требуется стабилизация антрахиноном [115а].

Касторовое масло представляет собой продукт растительного происхождения, полученный прессованием семян клещевины, произрастающей в СССР в ряде местностей (Северный Кавказ, Средняя Азия и т. д.). Очищенное касторовое масло—бесцветная или светложелтая жидкость, вязкость которой выше, чем у минерального масла, но ниже, чем у совола. По химической природе касторовое масло представляет собой смесь жидких жирных кислот; основной составной частью является рицинолевая кислота $C_{17}H_{32}OHCOOH$, содержание которой в масле около 80...85%.

Касторовое масло имеет повышенную ε, близкую к ε совола, но уступает последнему по другим электрическим свойствам (табл. 8) [123]. Касторовое масло в несколько раз дешевле совола и в наших условиях менее дефицитно. Американская промышленность применяет это масло для пропитки бумажных конденсаторов, рассчитанных на работу при повышенном напряжении постоянного или выпрямленного тока и при небольших нагрузках током технической частоты. В 1940 г. в СССР проводились удачные опыты по применению касторового масла в производстве автомобильных конденсаторов. В настоящее время касторовое масло применено при изготовлении фильтровых конденсаторов с рабочим напряжением 2 kV постоянного тока [124].

Касторовое масло представляет интерес не только как пропитывающая жидкость, но и как сырье для изготовления твердой пропиточной массы—олеовакса.

Основным типом полужидкой пропитывающей массы, применяемой в конденсаторостроении, является вазелин, представляющий собой смесь жидких и твердых высокомолекулярных углеводородов, получаемую при перегонке парафинистых сортов нефти. Вазелин получают также искусственным путем, смешивая церезин с минеральным маслом.

По внешнему виду вазелин представляет собой мазеподобную массу, бесцветную или желтоватую. Вазелин является нейтральным диэлектриком и по своим электрическим свойствам подобен парафину и церезину.

По сравнению с хлорированными продуктами (галовакс, совол) вазелин имеет повышенное удельное сопротивление, что особенно важно при высокой рабочей температуре; по величине ε вазелин уступает хлорированным массам.

Преимуществом бумажно-вазелиновых конденсаторов, по сравнению с парафинированными, является повышенная электрическая прочность.

Вазелин уже на протяжении ряда лет применяется рядом американских и европейских фирм для пропитки конденсаторов [125]. Особенно широкое применение вазелин нашел перед войной и во время войны для пропитки бумажных конденсаторов с высокой рабочей температурой, в частности, при изготовлении защитных конденсаторов для борьбы с радиопомехами [126].

Кроме вазелина, известное применение в производстве высоковольтных конденсаторов постоянного тока находила полужидкая масса, получаемая смешением канифоли с минеральным маслом [127]. Позже для пропитки этих конденсаторов перешли на применение чистого масла. Во время войны некоторые наши заводы применяли смесь канифоли с трансформаторным маслом для пропитки бумажных низковольтных конденсаторов ввиду временной дефицитности парафина и церезина. Повышенное значение ε масляно-канифольного компаунда (15...20% масла; 80...85% канифоли), составляющее около 2,8...3,0, дает при замене парафина этим компаундом экономию бумаги и фольги порядка 15%. Недостатки компаунда — липкость и недостаточно удовлетворительная электрическая прочность при длительном воздействии напряжения [127].

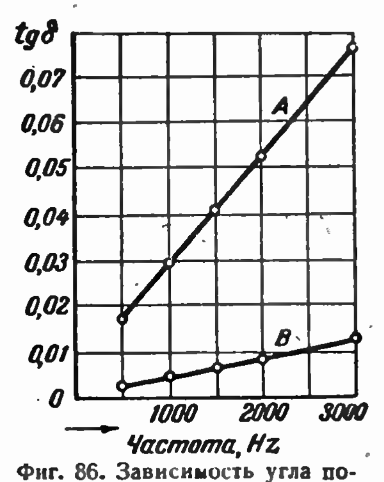
§ 45. Обкладки бумажных конденсаторов

В производстве бумажных конденсаторов в качестве обкладок применяется тонкая металлическая фольга в виде длинных лент, намотанных в рулоны. Рулонная форма фольги обеспечивает возможность изготовления конденсаторов намоткой (§ 42).

Раньше конденсаторная фольга изготовлялась из олова с небольшой присадкой сурьмы для облегчения прокатки [128]. В настоящее время оловянная фольга, вследствие своей дороговизны, большего удельного веса и повышенного удельного сопротивления, почти полностью вытеснена алюминиевой фольгой [129].

Применение оловянной фольги сохранялось некоторыми фирмами при изготовлении „безиндукционных" бумажных конденсаторов, у которых выступающие с торцов края обкладок подвергаются пайке; после разработки специальных припоев для пайки алюминия и в этом, частном, случае начали применять алюминиевую фольгу.

Удельный объем конденсатора примерно пропорционален толщине обкладок; поэтому выгодно максимально снижать толщину фольги. В настоящее время нижний предел толщины фольги, изготовляемой иностранными фирмами, составляет 6 микрон. Дальнейшее снижение толщины обкладок можно получить нанесением слоя металла непосредственно на поверхность бумаги. Попытки применить металлизированную бумагу в конденсаторостроении начались уже очень давно [130]. Конденсаторную бумагу покрывали химическим путем слоем олова толщиной 2...3 μ, после чего пропускали через вальцы для улучшения контакта между частицами и увеличения проводимости металлического слоя. Слой олова на поверхности бумаги имел проводимость в четыре раза ниже проводимости оловянной фольги (сопротивление слоя составляло 0,2 Ω на 1 cm² поверхности бумаги). В соответствии с этим обкладки из металлизированной бумаги создавали значительное последовательное сопротивление в конденсаторе и приводили к резкому возрастанию tg δ, особенно при повышенных частотах (фиг. 86). Кроме того, слой металлизированной бумаги по изолирующим свойствам был значительно хуже обычной бумаги; поэтому конденсатор с одним слоем простой бумаги и металлизированной бумагой в качестве обкладок имеет пониженное сопротивление изоляции и пониженное пробивное напряжение по сравнению с обычным конденсатором с двумя слоями бумаги и обкладками из фольги. В последние годы английские и шведские фирмы применяли такую металлизированную бумагу только для изготовления искрогасительных телефонных конденсаторов, используя повышенное сопротивление обкладок конденсатора в качестве сопротивления, входящего в схему искрогашения.



Фиг. 86. Зависимость угла потерь бумажных конденсаторов от частоты (Ренне):
A—обкладки из металлизированной бумаги, B—обкладки из алюминиевой фольги

Во время войны европейские фирмы применили в производстве конденсаторов новый тип металлизированной бумаги, при изготовлении которой тонкий слой металла, обычно цинка, наносится методом испарения в вакууме. Такая бумага может применяться даже без промежуточной прокладки простой бумаги, что дает очень малые значения удельного объема (до 4 $cm^3/\mu F$ при $U_{раб}=100...150$ V). Конденсаторы из металлизированной бумаги обладают свойством самовосстанавливаться после пробоя за счет оплавления тонкого слоя металла у пробитого места. Сопротивление изоляции таких конденсаторов понижено по сравнению с обычными [130а] и составляет 50...250 $M\Omega\cdot\mu F$. Угол потерь у этих конденсаторов имеет нормальные значения — благодаря „безиндукционной" намотке и специальной металлизации торцов секций.

§ 46. Намотка конденсаторных секций и их конструкция

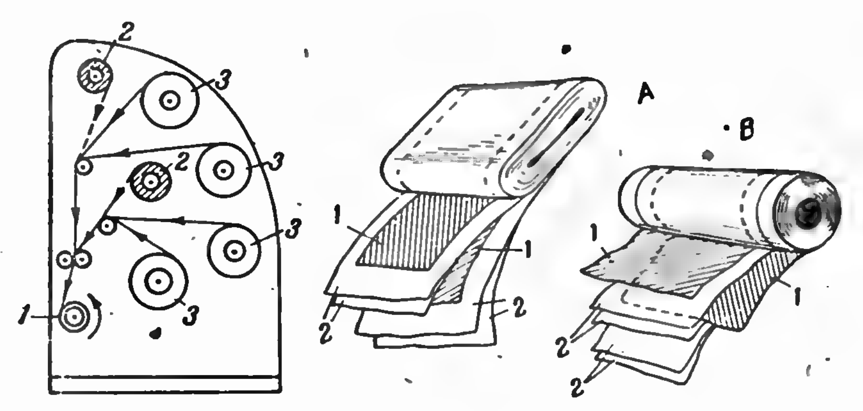
Намоточный конденсаторный станок представляет собой жесткую раму (обычно литую), на которой укреплена система осей для рулонов бумаги и фольги, и рабочий шпиндель, приводимый во вращение электромотором. В шпинделе закрепляют оправку, на которой производят намотку секции (фиг. 87). Число осей станка должно быть равно $2n+2$, где n — число слоев бумаги между обкладками конденсатора. Вследствие наличия в конденсаторной бумаге проводящих частиц минимальное значение числа слоев $n=2$, так как при $n=1$ неизбежно короткое замыкание между обкладками. Применение значения $n=1$ возможно лишь в случае отказа от обкладок из фольги и перехода на металлизированную бумагу (§ 45). Оси рулонов должны иметь приспособление для регулировки осевого перемещения рулонов, необходимого для выравнивания краев бумажных лент и для установки определенного расстояния между краями лент бумаги и фольги (закраины); станки снабжают счетчиками числа оборотов для учета числа витков в секции.

Иногда счетчик имеет приспособление для выключения станка после намотки установленного числа витков; это делает работу станка полуавтоматической. Некоторые американские фирмы применяют полностью автоматизированные намоточные станки. Производительность обычного полуавтоматического станка при изготовлении секций низковольтных конденсаторов 0,5...1 μF составляет 400...500 штук секций в смену.

Конденсаторные секции могут быть цилиндрическими и плоскими. В первом случае секцию наматывают на изоляционную трубку или стержень, закрепленный на шпин-

деле станка и снимающийся вместе с секцией; во втором случае секцию наматывают на цилиндрическую оправку, укрепленную в шпинделе, и после намотки снимают секцию с оправки и путем сжатия придают ей плоскую форму.

Маленькие цилиндрические секции можно наматывать без изоляционного основания в виде стержня или трубки



Фиг. 87. Схема станка для намотки бумажных конденсаторов: 1—рабочий шпиндель; 2—рулоны фольги; 3—рулоны бумаги

Фиг. 88. Намотка бумажных конденсаторов: A—обычная; B—безиндукционная (1—фольга; 2—бумага)

на оправку малого диаметра (3...4 mm), осторожно снимая с нее секцию после намотки.

Намотка секции может быть простой и „безиндукционной" (фиг. 88); во втором случае при намотке лентам фольги дают сдвиг к правому и левому торцам секции. Выступающие края фольги сминают на торцах и пропаивают, одновременно припаивая к ним выводные проводники. При обычной намотке контакты вкладывают в секцию в самом процессе намотки. Иногда применяют приварку контактов к обкладкам точечной сваркой. Это необходимо, когда конденсатор будет работать при высокой температуре.

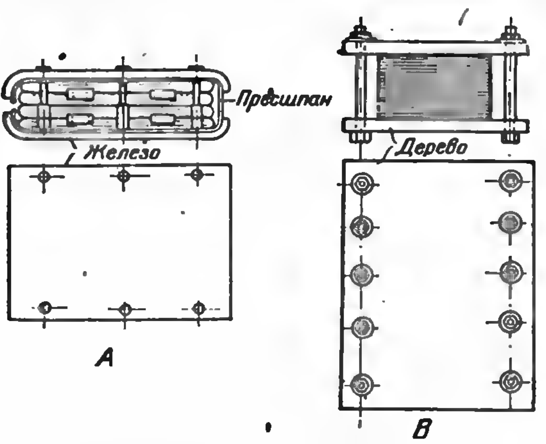
Если выводные контакты конденсаторной секции не были сильно сдвинуты друг относительно друга (§ 11), то замена обычной намотки на „безиндукционную" не дает существенного снижения индуктивности конденсатора. Поэтому выгодность такой намотки сводится не столько к уменьшению индуктивности, сколько к снижению потерь в конденсаторе при высокой частоте за счет снижения сопротивления обкладок (фиг. 89). Недостатком „безиндукционной" намотки является увеличенный расход фольги, поэтому этот метод намотки заменяют иногда увеличением

числа выводных контактов в конденсаторе. Для снижения сопротивления увеличение числа контактов менее эффективно, чем пропайка торцевых краев обкладок при „безиндукционной“ намотке; кроме того, увеличение числа выводов снижает производительность намоточного станка.



Фиг. 89. Зависимость температуры бумажного защитного конденсатора от времени воздействия токов высокой частоты (Якоби, Шнейдер и Шуман)
A—обычная намотка; *B*—безиндукционная намотка

Плоские секции, пропитанные воскообразной массой, сохраняют форму, приданную им прессованием, вследствие затвердевания пропитывающего вещества при его охлаждении до комнатной температуры. При пропитке плоских секций жидким диэлектриком для сохранения плоской формы применяют обжимки, в которых сразу зажимают все секции, входящие в изготовляемый конденсатор. Обычно применяют железные обжимки, изолированные от секций конденсатора прессшпаном, но для высоковольтных конденсаторов иногда применяют и деревянные обжимки (фиг. 90).



Фиг. 90. Обжимки в плоских конденсаторах с жидкой пропиткой:
A—конденсатор для улучшения коэфициента мощности; *B*—высоковольтный рентгеновский конденсатор

Подсчет числа витков конденсаторной секции, необходимого для получения заданной емкости, можно произвести по формулам, предложенным В. Т. Ренне [8, 131, 132]:

плоские секции: $N=\sqrt{\frac{C}{A}+A_1^2}-A_1,$ (62)

где $A = \frac{4\varepsilon b}{\pi} \cdot \frac{n\delta_1 + \delta_2}{n\delta_1}$ и $A_1 = \frac{\pi d_0}{16\,(n\delta_1 + \delta_2)}$,

цилиндрические секции: $N = \frac{D - d_0}{4\,(n\delta_1 + \delta_2)}$, (63)

где $D = \sqrt{d_0^2 + \frac{A_2 C}{\varepsilon b}}$ и $A_2 = 16\,(n\delta_1 + \delta_2) \cdot n\delta_1$.

В этих формулах введены следующие обозначения:
N — искомое число витков конденсаторной секции,
C — емкость секции, в cm,
δ_1 — толщина слоя бумаги, cm,
δ_2 — „ „ фольги, cm,
n — число слоев бумаги между обкладками,
b — ширина фольги, cm,
d_0 — диаметр намоточной оправки или наружный диаметр изоляционной втулки (или стержня) в случае цилиндрической секции, cm,
D — наружный диаметр цилиндрической секции, cm,
ε — диэлектрическая проницаемость пропитанной бумаги, которую надо выбирать в соответствии с типом пропиточной массы.

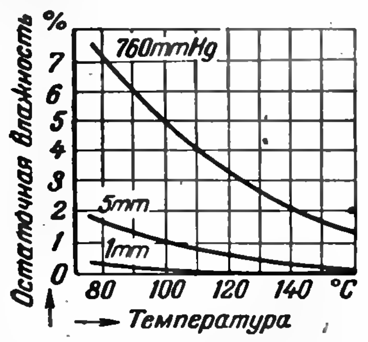
При пропитке парафином, церезином или минеральным маслом $\varepsilon = 3{,}2...3{,}5$; при пропитке галоваксом, соволом или касторовым маслом $\varepsilon = 4{,}5...5$ и при пропитке олеоваксом $\varepsilon = 6{,}5...7$.

Расчет дает искомое число витков с известным приближением, поэтому расчетные данные надо откорректировать, изготовив опытные образцы.

§ 47. Сушка и пропитка бумажных конденсаторов

Процесс сушки имеет своим назначением удалить воду, содержащуюся в бумаге в количестве 5...7%; удаление воды дает резкое возрастание сопротивления изоляции, уменьшение $\operatorname{tg}\delta$ и повышение электрической прочности конденсатора. Тщательная сушка особенно важна при последующей пропитке конденсатора жидким диэлектриком, так как электрическая прочность жидкости резко снизится, если в последнюю попадет вода, оставшаяся в бумаге при недостаточной сушке. Количество воды, оставшееся в бумаге после сушки ее до постоянного веса, определяется двумя факторами: температурой и давлением [133]. Для того чтобы свести к минимуму остаточное содержание воды, необходимо вести сушку при максимальной допустимой температуре и при минимальном возможном давлении в сушильной печи (фиг. 91).

Раньше температуру сушки брали не выше 110° С; теперь при сушке бумажных конденсаторов применяют температуру 130...140°С. Остаточное давление при сушке конденсаторов, пропитываемых воскообразными твердыми массами, следует брать не выше 20...30 mm, а желательно не выше 5 mm; при сушке конденсаторов, пропитываемых жидкими массами, остаточное давление следует брать не выше 0,5...1 mm; некоторые фирмы при сушке таких кон-



Фиг. 91. Зависимость остаточной влажности в конденсаторной бумаге от температуры при разных значениях давления (Альбин)

Фиг. 92. Кривая сушки бумажных конденсаторов (Ренне и Карпова)

денсаторов снижают давление до 0,15...0,20 mm ртутного столба.

Установление необходимого времени сушки для заданных условий процесса (объем печи, объем конденсаторов, условия теплопередачи и т. д.) производят следующими методами:

по электрическим характеристикам готовых конденсаторов, изготовленных при разных значениях времени сушки;

по прекращению выделения конденсата в конденсационной колонке вакуумной сушильной установки;

по результатам наблюдения за изменением электрических характеристик одного из конденсаторов, находящихся в печи, с течением времени сушки [133].

Третий метод изящен и дает наглядное представление о ходе процесса сушки (фиг. 92), но требует поддержания постоянства температуры в рабочем пространстве печи с точностью ± 1...2° С.

При контролировании процесса сушки этим методом об окончании процесса сушки судят по установлению постоянного значения измеряемой электрической характеристики (обычно по сопротивлению изоляции или по $\mathrm{tg}\delta$).

В обычной практике при сушке конденсаторов с твердой пропиткой время сушки берут равным 6...12 часов,

а при сушке конденсаторов с жидкой пропиткой от 30...35 до 100...120 часов. В начале процесса сушки, при разогреве печи, полезно вести работу при атмосферном давлении, чтобы ускорить прогрев конденсаторов и лишь спустя некоторое время включить вакуум. При сушке конденсаторов большого размера, с большой толщиной диэлектрика, для ускорения прогрева полезно производить подсушку конденсатора пропускаемым через него электрическим током.

В результате сушки удаляется один из нежелательных компонентов бумажной изоляции — вода, но остается второй — воздух, который дает сниженное значение емкости конденсатора (у воздуха $\varepsilon = 1$) и понижает электрическую прочность последнего. Назначение пропитки сводится к замене воздуха в порах бумаги твердым или жидким диэлектриком, обладающим повышенными, по сравнению с воздухом, значениями ε и $E_{пр}$.

В результате пропитки повышаются емкость и пробивное напряжение конденсатора, уменьшаются потери на ионизацию и улучшается теплоотвод от слабых мест диэлектрика.

Удаление воздуха происходит в процессе вакуумной сушки. Сразу же по окончании сушки в сушильную печь впускают нагретую пропиточную массу, которая и заполняет поры в бумаге и зазоры между слоями бумаги и фольги.

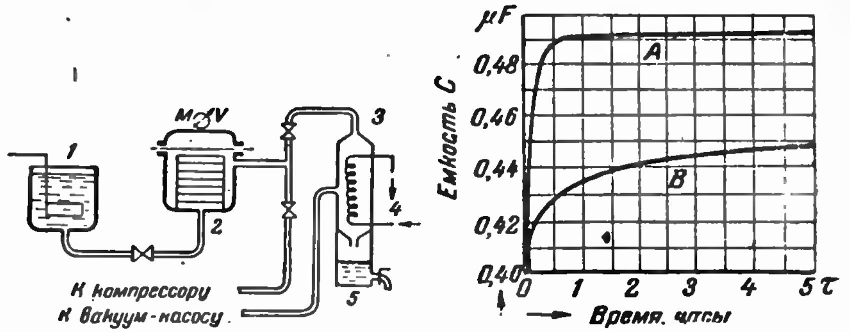
Обычная схема сушильно-пропиточной установки для пропитки конденсаторов воскообразной массой приведена на фиг. 93.

Перетекание массы из бака *1*, где производится ее разогрев и плавление, в сушильную печь *2* обусловлено разностью давлений в печи (вакуум) и в баке (атмосферное давление). По окончании пропитки остатки массы вытесняются в бак *1* созданием повышенного давления в печи при помощи компрессора, или же стекают за счет разности уровней, если бак *1* расположен ниже печи *2*. Весьма существенно впускать пропиточную массу в сушильную печь под вакуумом, так как только при этом происходит интенсивное впитывание массы. Применение вакуума позволяет получить значительный выигрыш в емкости конденсаторов (при пропитке парафином 10...15%, при пропитке галоваксом 30...35%) за счет увеличенного количества впитанной массы и позволяет применять небольшую продолжительность пропитки 1...2 часа.

Температуру нагрева пропиточной массы выбирают с таким расчетом, чтобы получить достаточно малую вязкость, обеспечивающую хорошую впитываемость массы в бумагу: перегрев массы опасен вследствие возможности

ее окисления в процессе разогрева и пропитки. Обычная температура нагрева воскообразных масс при вакуумной пропитке 110...140° С.

Процесс пропитки удобно контролировать наблюдением за изменением емкости одного из пропитываемых конден-



Фиг. 93. Схема установки для сушки и пропитки бумажных конденсаторов воскообразной массой: *1*—бак для разогрева массы; *2*—сушильно-пропиточный бак; *3*—конденсационная колонка; *4*—змеевик с охлаждающей водой; *5*—конденсированная вода, удалившаяся из конденсаторов при сушке; M—V—мановакуумметр

Фиг. 94. Кривая пропитки бумажных конденсаторов парафином (Ренне): *A*—впуск парафина под вакуумом; *B*—впуск без вакуума

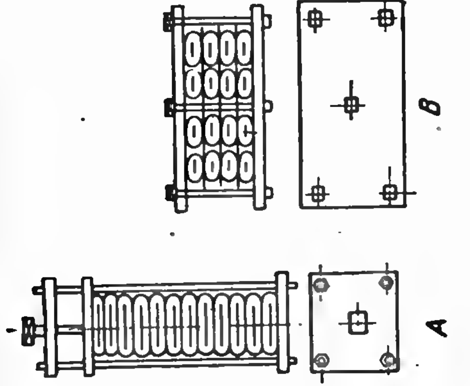
саторов (фиг. 94); установившееся значение емкости свидетельствует о заполнении всех пор бумаги массой.

После окончания пропитки желательно охлаждать конденсаторные секции в пропиточной массе до температуры близкой к точке застывания массы, так как при этом заметно улучшается пробивное напряжение и сопротивление изоляции. Чтобы не снижать производительности сушильно-пропиточной установки, охлаждение пропитанных секций производят часто в отдельных баках, наполненных той же пропиточной массой или массой с меньшей точкой плавления. При пропитке галоваксом охлаждение иногда проводят в парафине или в парафиновом масле.

Прессовку конденсаторов, пропитанных воскообразной массой, раньше производили после пропитки при помощи прессов, пластины которых охлаждались водой для ускорения застывания массы.

Теперь применяют „сухую прессовку"— предварительное сжатие конденсаторных секций в специальных струбцинках (фиг. 95). Зажатые в струбцинках секции сушат, пропитывают, охлаждают до комнатной температуры и только после этого извлекают их из струбцинок. Оптимальное удельное давление при сжатии 1,5...2 kG/cm². Применение сухой прессовки позволило резко повысить электрические свойства конденсаторов и улучшить их однородность [134].

Если от конденсаторов не требуется очень малый $tg\delta$ и высокое сопротивление изоляции, то при их изготовлении можно применить упрощенный процесс пропитки невысушенных конденсаторных секций в горячей пропиточной массе. Этот процесс называют „проваркой“.. При проварке одновременно с процессом впитывания массы происходит процесс сушки бумаги, так как горячая масса, проникая в поры бумаги, нагревает находящуюся там воду и заставляет ее испаряться. Высушивание бумаги при проварке оказывается далеко не столь полным, как при вакуумной сушке, а потому сопротивление изоляции проваренных конденсаторов составляет 100...1000 MΩ·μF, тогда как при вакуумной сушке можно получать свыше 10 000 MΩ·μF. Электрическая прочность при проварке имеет величину того же порядка, как при хорошей вакуумной сушке-пропитке, но $tg\delta$ несколько повышен.

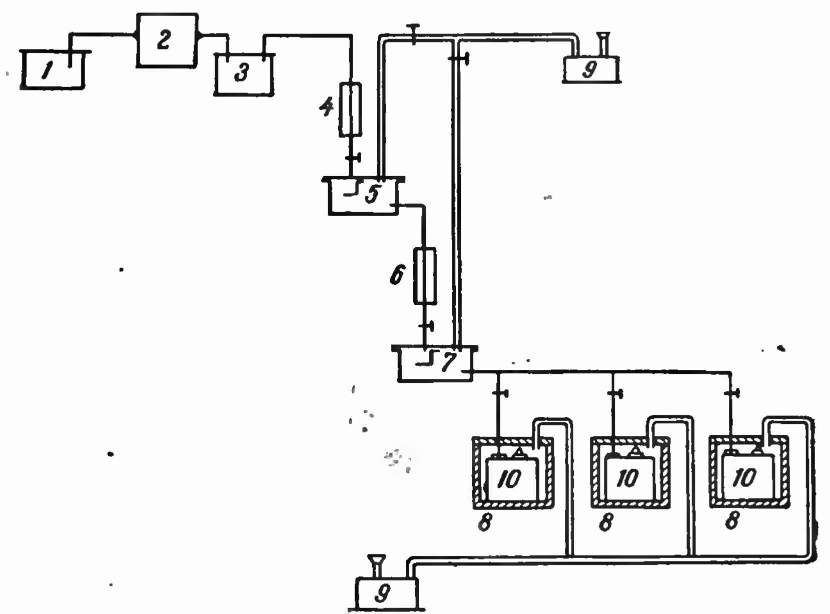


Фиг. 95. Струбцинки для сухой прессовки бумажных конденсаторов:
A — неправильная конструкция; *B* — правильная конструкция

Оптимальный режим проварки от 3 до 6 часов при температуре 155...165°С. Повышенная температура необходима для получения удовлетворительных электрических свойств, хотя и приводит к заметному окислению пропиточной массы. Преимущества процесса проварки: упрощение оборудования в результате работы без применения вакуума и сокращенная продолжительность процесса по сравнению с суммарным временем вакуумной сушки и пропитки. Для проварки можно применять только парафин или церезин; последний лучше, так как меньше окисляется. Галовакс не годится потому, что при температуре проварки разрушает бумагу, а олеовакс потому, что сам заметно ухудшает свои свойства при этой температуре. Кроме того, оба эти материала имеют пониженное удельное сопротивление, а потому проваренные в них конденсаторы часто имеют сопротивление изоляции ниже 100 MΩ·μF, что обычно недопустимо. Подсушивать секции перед проваркой не следует, так как это дает ухудшение впитываемости массы и снижает пробивное напряжение конденсатора. Улучшение сопротивления изоляции проваренных конденсаторов может быть достигнуто кратковременным созданием

вакуума в конце процесса проварки; при этом из бумаги быстро удаляется часть воды, остающаяся в ней при обычной проварке, что дает заметное улучшение электрических свойств [134].

Пропитку жидким диэлектриком можно применять только после тщательной вакуумной сушки при малом значении остаточного давления. Весьма желательно сушить и про-



Фиг. 96. Схема установки для сушки и пропитки бумажных конденсаторов минеральным маслом:
1—сырое масло; *2*—фильтрпресс; *3*—профильтрованное масло; *4*, *6*—подогрев масла; *5*, *7*—баки для сушки масла; *8*—вакуумпечи; *9*—вакуумнасосы; *10*—конденсаторы

питывать конденсаторы, уже собранные в корпусах. В этом случае крышка конденсатора припаивается или приваривается к корпусу, и для выхода воды из конденсатора и для впуска в него жидкого диэлектрика используется только небольшое отверстие в крышке. Это отверстие запаивается сразу же после охлаждения конденсатора, в конце процесса пропитки.

Конденсаторы сушатся и пропитываются сжатыми в своих обжимках (фиг. 90). Оптимальное удельное давление при стяжке обжимок составляет для секций небольших размеров 1...5 kG/cm², для больших высоковольтных секций из кабельной бумаги 5...10 kG/cm².

Пропитывающая жидкость должна быть тщательно очищена адсорбентом (глина „кил", фуллерова земля и т. д.), профильтрована, высушена и обезгажена обра-

Таблица 9

Основные типы бумажных конденсаторов с воскообразной пропиткой

№№ пп	Область применения	Рабочее напряжение, V	Номинальная емкость, μF	Максимальное рабочее значение		Пропиточная масса	Конструкция
				температура, °C	влажность, %		
1	Телефонная и телеграфная аппаратура	150...300 постоянный ток	от 0,01...0,05 до 1...2	40...45	65...70	Парафин олеовакс	Плоский металлический корпус
2	Радиоприемная аппаратура .	от 150...200 до 500...600 постоянный ток	от 0,001...0,005 до 2...4	50...60	65...70	Парафин церезин галовакс	Цилиндрический картонный корпус, без корпуса
3	Специальная аппаратура связи	от 150...200 до 500...600 постоянный ток	0,1...2	60...75	95...100	Церезин галовакс	Плоский металлический герметизированный корпус
4	Звуковое кино, телевидение, маломощная радиопередающая аппаратура (заменяются бумажно-масляными)	1000...2000 постоянный ток	0,1...4	50...60	65...70	Церезин галовакс	Плоский металлический корпус
5	Борьба с радиопомехами (заменяются бумажно-вазелиновыми)	200...600 постоянный ток 120...380 перем. ток	от 0,05...0,25 до 0,5...2	от 60...75 до 100	95...100	Церезин галовакс	Плоский или цилиндрический герметизированный корпус
6	Автотракторное электрооборудование	200...300 переменный ток	от 0,05 до 0,2...0,25	90...100	95...100	Галовакс	Цилиндрический металлический корпус

боткой под вакуумом (иногда до 48 часов). Продолжительность пропитки резко увеличена по сравнению с пропиткой твердыми массами и составляет до 8...16 часов.

Схема опытной установки для сушки и пропитки бумажно-масляных конденсаторов приведена на фиг. 96. Сырое масло из бака *1* перекачивают через фильтрпресс *2* в бак *3*. Оттуда через подогреватель *4* нагретое фильтрованное масло поступает в вакуумный бак *5*, причем из него удаляется влага.

Для интенсификации сушки масла оно разбрызгивается при входе в бак *5*, при ударе струн масла об особую пластинку. Сушка масла повторяется в нагревателе *6* и баке *7*.

Дважды просушенное масло поступает в конденсаторы *10*, установленные в вакуумпечах *9*, после того как закончен процесс сушки конденсаторов [135].

§ 48. Бумажные конденсаторы с воскообразной пропиткой

Сводка основных данных о выпускаемых современным конденсаторостроением типах конденсаторов с твердой воскообразной пропиткой (табл. 9) показывает, что рабочее напряжение этих конденсаторов невелико и обычно не превышает 500...600 V постоянного тока. Применявшиеся ранее конденсаторы с твердой пропиткой, рассчитанные на рабочее напряжение 1000...2000 V, теперь заменяются бумажно-масляными конденсаторами, обладающими повышенной надежностью при длительной работе.

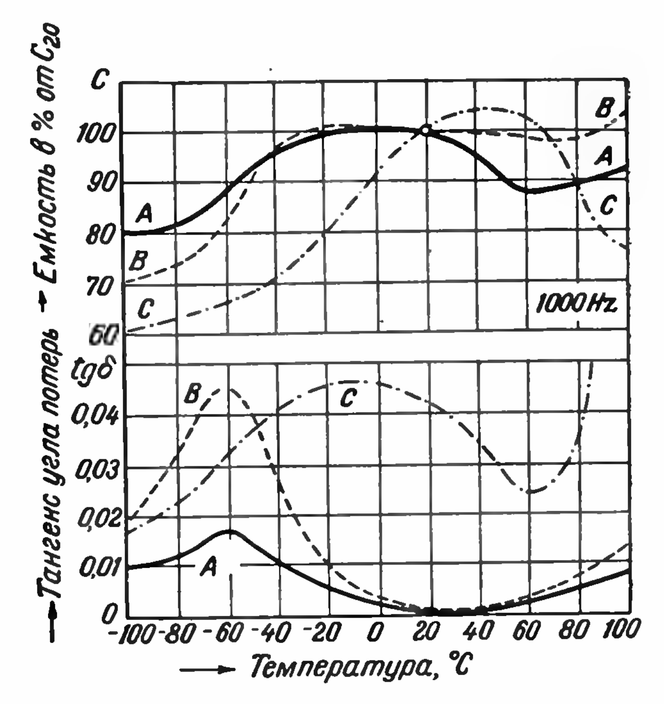
Номинальная емкость конденсаторов рассматриваемого типа может колебаться в широких пределах: от 0,001...0,10 μF до 1...10 μF. Обычный допуск по емкости составляет ± 10% для емкостей от 0,1 μF и выше и ± 20% для конденсаторов малой емкости. Для специальных целей могут изготовляться конденсаторы с допуском ± 2...3%; этот допуск осуществляется отбором из больших партий, или параллельным соединением нескольких секций, подобранных по емкости. В случае галоваксных конденсаторов для получения узкого допуска по емкости можно применить термоэлектрический метод подгонки [8]. Температурный коэфициент емкости конденсаторов в области температур от +15 до +30° С зависит от рода пропиточной массы и от плотности бумаги (табл. 10).

Изменение емкости в широком диапазоне температур определяется характером температурных изменений ε сухой бумаги и пропиточной массы (фиг. 75, 76, 79, 82 и 97); при отрицательных температурах неизбежно снижение емкости, обусловленное снижением ε клетчатки и усиленное

Таблица 10

Температурный коэфициент емкости бумажных конденсаторов с воскообразной пропиткой: α_C% на 1° C (1000 Hz)

Пропиточная масса	Плотность бумаги	
	0,95...1,05 G/cm³	1,20...1,30 G/cm³
Парафин	— 0,100...0,200	+ 0,100...0,150
Церезин	— 0,020...0,060	—
Галовакс	— 0,010...0,030	+ 0,040...0,060
Галовакс + 5% бензилцеллюлозы	± 0,005...0,015	+ 0,030...0,050
Олеовакс	+ 0,400...0,500	



Фиг. 97. Зависимость емкости и угла потерь бумажных конденсаторов с воскообразной пропиткой от температуры (Рение):

A—пропитка парафином; *B*—пропитка галоваксом; *C*—пропитка олеоваксом

снижением ε дипольных пропитывающих масс в этом диапазоне температур. Повышение частоты вызывает заметное снижение емкости конденсатора, обусловленное уменьшением ε пропитанной бумаги с частотой. Парафинированные конденсаторы при переходе от постоянного тока к частоте

50...1000 Hz уменьшают емкость на 4...5%; дальнейшее повышение частоты до 10^4 Hz дает дополнительное снижение емкости на 1,5%.

Конденсаторы, пропитанные дипольными диэлектриками, дают увеличенное снижение емкости с частотой. Так, при переходе от частоты 500 Hz к частоте 2500 Hz В. Т. Ренне были получены следующие значения снижения емкости: в случае парафина и церезина 0,35...0,45%; в случае галовакса и сплава галовакса с бензилцеллюлозой 0,75...0,80%; в случае олеовакса 4,5...5%. При частотах выше 10^5 Hz происходит резкое снижение емкости, обусловленное влиянием последовательного сопротивления обкладок (§ 13), которое оказывается тем сильнее, чем выше номинальная емкость. При частоте 10^6 Hz конденсатор емкости 1 μF снижает емкость на 10%, а конденсатор емкостью 2 μF — на 50%. При малых номинальных емкостях снижение емкости в этом диапазоне частот не столь значительно.

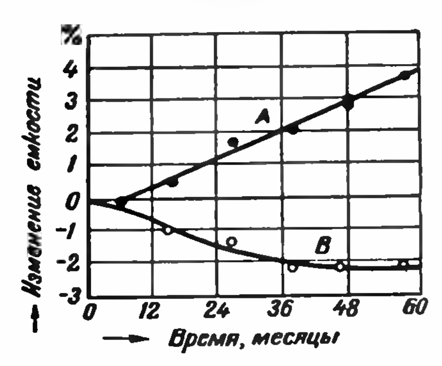
Характер изменения емкости во времени при длительной работе или хранении зависит от степени герметизации конструкции конденсатора [139].

Если доступ влаги полностью исключен, то с течением времени наблюдается снижение емкости, постепенно замедляющееся; за несколько лет снижение емкости составляет 1,5...2,5%. Если влага проникает внутрь конденсатора, то емкость его с течением времени систематически возрастает (фиг. 98).

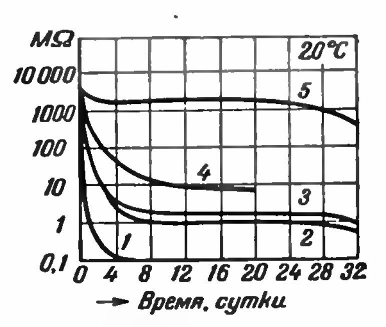
Обычная норма по углу потерь для конденсаторов с воскообразной пропиткой при температуре +15...25° C и частоте 1000 Hz составляет: $\operatorname{tg}\delta \leqslant 0{,}015$. При пропитке парафином, церезином и галоваксом обычное значение $\operatorname{tg}\delta = 0{,}004...0{,}008$. При пропитке олеоваксом угол потерь выше нормы: $\operatorname{tg}\delta = 0{,}040...0{,}080$. Зависимость угла потерь конденсатора от температуры в основном определяется ходом температурной зависимости угла потерь пропиточной массы (фиг. 97). При недостаточной просушке конденсатора возрастание угла потерь с температурой может наблюдаться уже при температуре +30...40° C за счет увеличенных потерь на проводимость диэлектрика. В этом случае при температурах +90...100° C $\operatorname{tg}\delta$ может достигнуть значения 0,20...0,30 и выше. Такой же эффект получается при пропитке недостаточно очищенной массой с электролитическими примесями.

Повышение частоты вызывает рост $\operatorname{tg}\delta$, обусловленный возрастанием потерь в обкладках (фиг. 86) и дипольными потерями в клетчатке. В наиболее благоприятном случае (малая емкость и безиндукционная намотка) $\operatorname{tg}\delta$ при высоких частотах имеет следующие значения: при 10^4 Hz...0,01; при 10^5 Hz...0,02; при 10^6 Hz...0,04 и при 10^7 Hz...0,07. Конденсаторы большой емкости с обычной намоткой имеют при

этих частотах значительно более высокий угол потерь [141]. Неизбежное наличие воздушных включений в конденсаторе с твердой воскообразной пропиткой приводит к резкому возрастанию угла потерь с напряжением, когда последнее превышает значение ионизирующего напряжения U_0 (фиг. 13).



Фиг. 98. Зависимость емкости бумажных парафинированных конденсаторов от времени при длительном хранении в комнатных условиях (Ренне):
А—в конденсатор проникает влага; *В*—конденсатор изолирован от влаги



Фиг. 99. Зависимость сопротивления изоляции бумажных автомобильных конденсаторов от времени выдержки при влажности 95...98% (Ренне):
1—незащищенный пропитанный конденсатор; *2*—в металлическом корпусе с фибровой крышкой; *3*—то же с текстолитовой крышкой; *4*—то же с гетинаксовой крышкой; *5*—в металлическом корпусе с фибровой крышкой, поверх которой нанесен слой битума

Поэтому конденсаторы данного типа неудовлетворительно работают в цепи переменного тока даже при относительно небольших напряжениях ($U > 300...350$ V).

Сопротивление изоляции бумажных конденсаторов с воскообразной пропиткой обычно лежит выше нормы, составляющей 100...200 MΩ·μF, или 1000 MΩ для емкостей менее 0,1 μF (выдержка под напряжением 100 V в течение 1 минуты; + 15...25° C). При хорошей вакуумной сушке легко получить значение 10 000...20 000 MΩ·μF при пропитке парафином или церезином и 2000...5000 MΩ·μF при пропитке галоваксом. При увеличенном времени выдержки под напряжением можно получить более высокие значения сопротивления изоляции; повышение напряжения приводит к заметному снижению этих значений (фиг. 5). Зависимость логарифма сопротивления изоляции от температуры может быть выражена формулой (19), в которой для конденсаторов данного типа можно положить $b = 0{,}035...0{,}040$. Сопротивление изоляции бумажных конденсаторов резко падает, если в конденсатор проникает вода (фиг. 99) [140].

При высокой влажности у плохо защищенного конденсатора сопротивление изоляции может снизиться от 10 000 MΩ до 0,1...1 MΩ и даже до 0,01 MΩ.

Пробивное напряжение бумажных конденсаторов зависит от многих факторов: от толщины и качества бумаги, от числа слоев бумаги, от тщательности пропитки и от рода пропиточной массы [142]. Увеличение площади обкладок при увеличении номинальной емкости конденсатора дает заметное снижение пробивного напряжения (фиг. 15). Зависимость пробивного напряжения от времени пребывания конденсатора под напряжением (кривая жизни) может быть выражена формулой:

$$U_{пр} = A\tau^{-n}, \tag{64}$$

где $U_{пр}$ — в V и τ — в сек.

Коэфициент A зависит от типа конденсатора. Величина коэфициента n составляет для парафинированных конденсаторов из отечественной бумаги 0,10...0,11 [143], для галоваксных конденсаторов из отечественной и американской бумаги 0,12...0,13 и для галоваксных конденсаторов из финской бумаги высокой плотности 0,18...0,19 [8]. Формула (64) справедлива при значении $\tau < 100$ часов. При больших значениях τ расчетные значения $U_{пр}$ надо снижать примерно в два раза. При поглощении влаги бумажный конденсатор резко снижает пробивное напряжение. Если характеризовать количество поглощенной влаги величиной сопротивления изоляции конденсатора R, то зависимость $U_{пр} = f(R)$ можно выразить приближенной формулой:

$$U_{пр} = B + m\lg R, \tag{65}$$

где $U_{пр}$ — в V и R — в MΩ·μF. Коэфициент $m = 210...225$; коэфициент B зависит от типа конденсатора; формула (65) проверена для галоваксных конденсаторов и справедлива при $R < 30...60$ MΩ·μF.

Повышение температуры вызывает заметное снижение пробивного напряжения бумажных конденсаторов. Если принять пробивное напряжение при +35° C равным $U_{пр} = 100\%$, то при +60° C $U_{пр} = 70\%$, а при +100° C $U_{пр} = 40\%$ [35]. При низких значениях сопротивления изоляции конденсаторов, обусловленных нагревом или поглощением влаги, могут создаться условия, делающие возможным тепловой пробой конденсатора. Критическое значение сопротивления изоляции, при котором возможен тепловой пробой при заданном напряжении U, можно подсчитать по формуле:

$$R_{min} = C\frac{U^2}{\delta^2}, \tag{66}$$

где $R_{мин}$ — в MΩ · μF; U — в V; δ — суммарная толщина диэлектрика в cm; коэфициент $C = 0{,}8 \cdot 10^{-10}$ для плоских конденсаторов емкостью 1...2 μF [143].

Вследствие большого разброса значения пробивных напряжений бумажных конденсаторов формулы (64—66) справедливы лишь для средних значений, характерных не для каждого отдельного конденсатора, а для исследуемой партии конденсаторов в целом.

Основные варианты конструктивного оформления бумажных конденсаторов с воскообразной пропиткой могут быть сведены к следующим типам:

1. Конденсаторная секция без корпуса, защищенная лаковым покрытием или погружением в компаунд, иногда перед покрытием заворачивается в лакоткань или в лакобумагу. Этот метод защиты не обеспечивает влагостойкости даже при кратковременном действии комнатной влажности. Такие конденсаторы применяются в радиоприемной аппаратуре для сборки блоков. Подобранные в блок секции помещаются в общий металлический корпус и заливаются компаундом (обычно нефтяной битум).

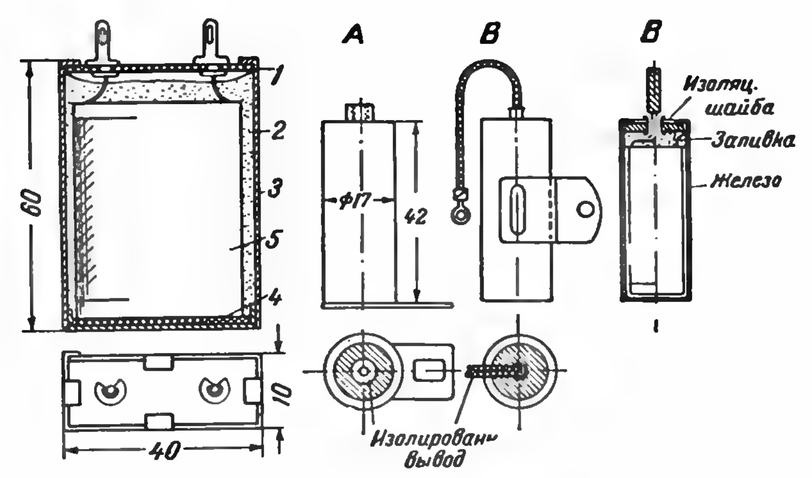
2. Конденсатор в цилиндрическом картонном корпусе, залитом с торцов битумом (отечественные обозначения: БК, БИК), применяется при небольших номинальных емкостях для висячего монтажа в радиоприемниках. Удобен вследствие легкости, но имеет низкую влагостойкость.

3. Конденсатор, запрессованный в пластмассу. Применяется в США взамен предыдущего типа, как более влагоустойчивый.

Для опрессовки применяют специальную пластмассу на основе винилитовой смолы с пониженной температурой прессования 75...95° C.

4. Конденсатор в металлическом корпусе, залитый битумом или другим компаундом, не герметизированный, с верхней изоляционной крышкой. В прямоугольном исполнении применяется при емкостях 0,1...4 μF в телефонной и телеграфной технике (фиг. 100) и в радиоприемной аппаратуре. В цилиндрическом исполнении с одним изолированным выводом при емкости 0,2...0,25 μF применяется в автотракторной технике (фиг. 101). При нормальной влажности влагостойкость конденсатора удовлетворительна, хотя при длительном хранении или работе постепенное снижение сопротивления изоляции наблюдается и при влажности порядка 50...60%. При высокой влажности сопротивление изоляции быстро падает, что объясняется не только проникновением влаги внутрь конденсатора, но и повышенной утечкой в отсыревшей верхней крышке (фиг. 99).

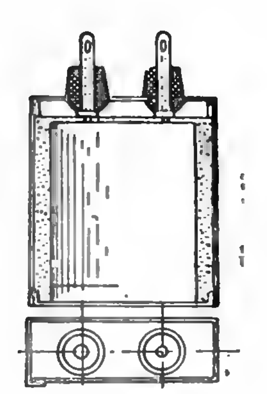
5. Конденсатор герметизированного типа в металлическом корпусе с металлической крышкой. Выводы изолированы



Фиг. 100. Бумажный парафинированный конденсатор телефонного типа:
1—изоляционная крышка (гетинакс) с выводными клеммами; 2—заливочная масса (битум); 3 — стенки корпуса (жесть); 4—прокладка на дне (пропитанный прессшпан); 5—конденсаторная секция

Фиг. 101. Автомобильные бумажно-галоваксные конденсаторы:
А—тип ГАЗ; *В*—тип ЗИС

пластмассой (фиг. 102). Отечественные обозначения: МКВ, БГТ. Конденсатор имеет повышенную влагостойкость, но все же не может обеспечить длительной работы при высокой влажности.



Фиг. 102. Бумажно-галоваксный конденсатор герметизированной конструкции с выводными клеммами, опрессованными пластмассой

Заметное снижение сопротивления изоляции начинает наблюдаться уже через 2...3 месяца пребывания конденсатора при влажности 95...100%.

Таким образом ни одна из обычных конструкций бумажных конденсаторов с твердой пропиткой не обеспечивала вполне надежной влагостойкости. Проблема создания бумажного конденсатора, уверенно работающего при длительном действии высокой влажности, решена применительно к бумажно-вазелиновым конденсаторам (§ 49).

Во многих случаях применения бумажных конденсаторов с воскообразной пропиткой очень большое значение имеет

вопрос о снижении их габаритов. Для уменьшения удельного объема конденсаторов прибегают к применению пропиточных масс с повышенной ε и к снижению толщины бумаги. При нижнем пределе толщины бумаги 6...6,5 μ (в два слоя) и пропитке галоваксом ($\varepsilon = 5$) можно получить удельный объем 8...10 $cm^3/\mu F$.

Рабочее значение напряженности поля для конденсаторов с воскообразной пропиткой при длительной работе берут равным 10...12 $\frac{kV}{mm}$ (постоянный ток). Пробивная напряженность при быстром испытании составляет 100...200 $\frac{kV}{mm}$.

§ 49. Бумажно-вазелииовые коиденсаторы

Основным преимуществом полужидкой пропиточной массы (вазелина) является возможность обеспечить высокую рабочую температуру бумажного конденсатора. При изготовлении конденсаторов для рабочей температуры до +70...100° C некоторые иностранные фирмы пошли на широкую замену вазелином ранее применявшегося для пропитки этих конденсаторов галовакса. Такая замена потребовала некоторого увеличения объема конденсатора (ε у вазелина ниже, чем у галовакса), но дала резкое улучшение электрических свойств конденсатора при повышенной температуре (фиг. 103). Температурный коэфициент емкости бумажно-вазелиновых конденсаторов, намотанных из бумаги повышенной плотности при температуре выше 0° C, составляет +0,040...0,045% на 1° C; при температурах ниже 0° C емкость снижается по сравнению с ее значением при +20° C; при —20° C снижение емкости 1,3%; при —40° C — 5% и при — 60° C — 10...11% (1000 Hz).

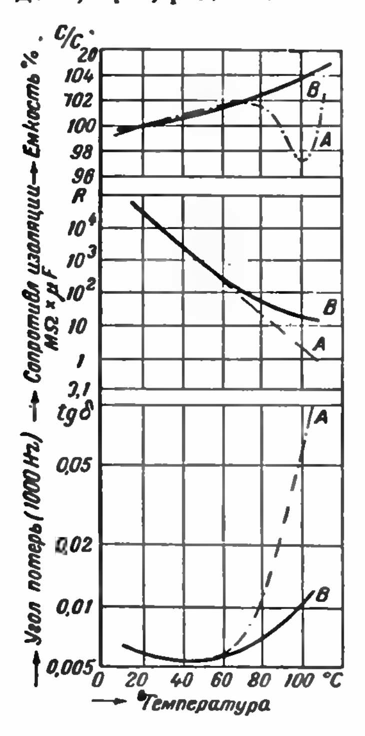
Отклонение емкости от номинала составляет ± 5%. При нормальной температуре сопротивление изоляции конденсаторов составляет 6000...13000 $M\Omega \cdot \mu F$; $tg\delta = 0{,}005...0{,}006$ при 1000 Hz.

Бумажно-вазелиновые конденсаторы применяют главным образом в качестве защитных конденсаторов для борьбы с радиопомехами. Эти конденсаторы должны быть рассчитаны на тяжелые условия работы, так как часто монтируются непосредственно на корпусах электромашин и другой аппаратуры, являющейся источником помех. Поэтому помимо высокой рабочей температуры должна быть обеспечена высокая влагостойкость конденсатора. Для этой цели применяют герметическую коиструкцию, представляющую собой герметически запаянный металлический корпус с неорганической изоляцией выводов (керамика, специальное стекло) или керамический корпус с напаянными к нему металлическими крышками (фиг. 104).

В последнее время освоение производства бумажных конденсаторов герметизированной конструкции такого типа начато и нашим конденсаторостроением.

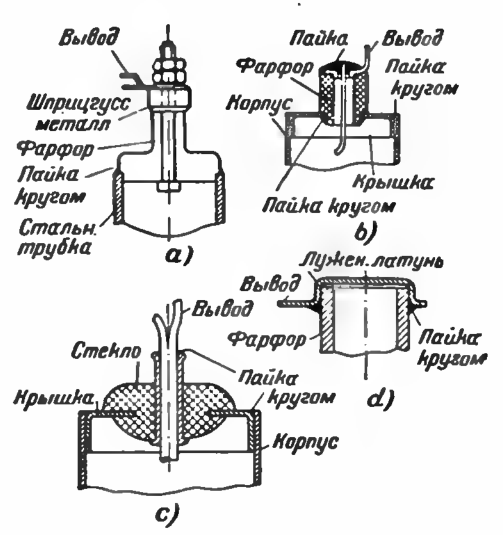
Защитные конденсаторы выпускаются с емкостью от 0,05 до 0,5 μF, редко до 1...2 μF; обычно цилиндрического типа.

В центральном осевом отверстии конденсатора часто вмонтирован плавкий предохранитель для защиты аппаратуры, к которой подключен конденсатор при пробое по-



Фиг. 103. Зависимость электрических свойств бумажных конденсаторов от температуры (Ренне и Шляхтер):

А—бумажно-галоваксный конденсатор; *В*—бумажно-вазелиновый конденсатор



Фиг. 104. Герметическая заделка выводов в бумажно-вазелиновых конденсаторах:

a—фарфоровый изолятор, впаянный в корпус; *b*—фарфоровый изолятор, впаяный в крышку; *c*—стеклянный изолятор, впаянный в крышку; *d*—фарфоровый корпус с припаянной металлической крышкой

следнего. Иногда применяют защитные конденсаторы „проходного“ типа. В этих конденсаторах одна обкладка присоединена к корпусу, а вторая — к медной шинке, на которую намотан конденсатор. Концы шинки выходят с торцов конденсатора и изолированы от корпуса проходными изоляторами.

Эта конструкция позволяет включить конденсатор непосредственно в провод сильного тока, идущий от объекта помех; этим исключается влияние индуктивности соединительных проводников от конденсатора к объекту радио-

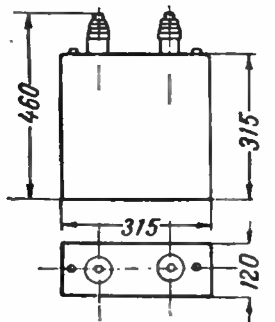
помех. Измерение емкости проходных конденсаторов надо производить между корпусом и любым из изолированных выводов (измерение между выводами при этой конструкции показывает „короткое") [144].

Рабочее напряжение защитных конденсаторов обычно невелико: до 250...500 V постоянного тока или до 200...300 V переменного тока 50 Hz, но они могут подвергаться воздействию дополнительной нагрузки токами высокой частоты (токами радиопомех). Кроме того, когда эти конденсаторы монтируются на электромашинах, они должны проходить вместе с последними испытание на пробой, принятое для сильноточного оборудования ($U_{ис} = 2\ U_{раб} + 1000$ V).

Это заставляет изготовлять защитные конденсаторы с повышенным запасом электрической прочности до 10...20.

§ 50. Бумажно-масляные и бумажно-соволовые конденсаторы

Повышенная электрическая прочность, пониженный $\operatorname{tg}\delta$ и большая надежность в работе обеспечили бумажным конденсаторам с жидкой пропиткой широкое и разнообразное применение в технике сильных токов и высоких напряжений (табл. 11).



Фиг. 105. Статический бумажно-масляный конденсатор: 6 kV; 12 kVAR

Основной тип конденсатора с жидкой пропиткой рассчитывается на работу при технической частоте и применяется главным образом для улучшения коэфициента мощности промышленных установок (фиг. 105). Конструкция этих конденсаторов имеет два основных варианта [145]:

1) Конденсатор небольшой реактивной мощности до 15...25 kVAR собирается из плоскопрессованных секций (фиг. 90), соединяемых последовательно-параллельно в соответствии с рабочим напряжением и номинальной реактивной мощностью. Корпус — легкий, тонкостенный.

2) Конденсатор большой реактивной мощности до 500...1000 kVAR; собирается из цилиндрических секций, также соединяемых последовательно-параллельно. Корпус тяжелый, толстостенный, как у больших трансформаторов.

Первый вариант конструкции принят в США и в СССР, второй применялся в Западной Европе. Второй вариант конструкции оказался менее надежным в эксплоатации вследствие усиленной ионизации масляных прослоек, которые в цилиндрических секциях развиты гораздо сильнее,

Таблица 11

Основные типы бумажных конденсаторов с жидкой пропиткой

№№ пп	Область применения	Рабочее напряжение, эффективное значение	Рабочая частота, Hz	Номинальная мощность, kVAR	Номинальная емкость, μF	Пропиточная масса
1	Установки сильного тока технической частоты (улучшение cos φ, регулирование напряжения и т. д.)	от 220...380 V до 10...30 kV	15...60 обычно: 50	от 1...5 до 100...500	—	Минеральное масло, пентахлордифенил
2	Улучшение cos φ индукционных печей	от 300...500 V до 3...5 kV	$10^3...10^4$	от 10...50 до 100...500	—	Минеральное масло, пентахлордифенил
3	Включение в линию передачи высокого напряжения (делитель напряжения, конденсатор связи и т. д.)	от 30...60 kV до 100...200 kV	50	—	0,001...0,002	Минеральное масло
4	Установки с высоким выпрямленным напряжением (рентгеновская аппаратура) и импульсные генераторы	от 30...60 kV до 100...150 kV	Постоянный ток или импульсы	—	от 0,001 до 0,1...0,5	Минеральное масло
5	Фильтры мощных передатчиков; маломощные радиопередатчики и другая высокочастотная аппаратура	1...10 kV	Постоянный ток	—	от 0,1...0,2 до 2...5	Минеральное масло, пентахлордифенил, касторовое масло
6	Однофазные конденсаторные электродвигатели	от 120...220 V до 0,75...1 kV	50	—	0,25...10	Минеральное масло, пентахлордифенил

чем в хорошо сжатых плоских секциях. В связи с этим западноевропейские фирмы в последние годы начали переходить на систему плоских секций. Некоторые фирмы сохраняют при этом переходе принцип сборки конденсатора большой реактивной мощности в одном корпусе, а для увеличения надежности конденсатора в работе включают каждую секцию через индивидуальный предохранитель, отключающий секцию в случае ее пробоя [146—147]. Такие конденсаторы изготовляют сейчас с реактивной мощностью 100...400 kVAR. Голландская фирма Филипс сохранила цилиндрическую форму секций, а для ослабления ионизации масла применила наполнение конденсатора сжатым азотом при давлении 12...15 атмосфер [148].

Современные американские конденсаторы, пропитанные пентахлордифенилом, при рабочем напряжении 3...6 kV имеют удельный объем 0,95...1 $\frac{dm^3}{kVAR}$ и вес 1,8...1,9 $\frac{kG}{kVAR}$. Отечественные бумажно-масляные конденсаторы такого же типа имеют 2...2,5 $\frac{dm^3}{kVAR}$ и 2,5...3 $\frac{kG}{kVAR}$; замена масла соволом позволила нашим заводам приблизить эти характеристики к американским.

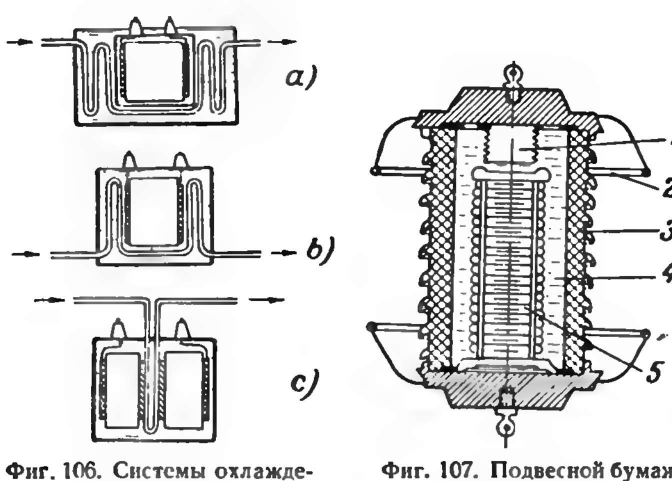
Для улучшения коэфициента мощности в СССР обычно применяют принцип групповой компенсации (§ 12), для чего на подстанции промышленного предприятия устанавливают батарею конденсаторов с требуемой суммарной реактивной мощностью [149—151]. Батареи конденсаторов с высоким рабочим напряжением должны снабжаться разрядными сопротивлениями, обеспечивающими безопасность обслуживающего персонала [152]. Каждый конденсатор батареи включают через индивидуальный предохранитель, защищающий батарею при пробое отдельных конденсаторов [153].

Такой же тип статического конденсатора применяют в США для последовательного включения в распределительные линии (сериесные конденсаторы). Тщательно герметизированная конструкция позволяет устанавливать эти конденсаторы на открытом воздухе. Вопрос о применении сериесных конденсаторов поставлен и в СССР [154].

Конденсаторы для улучшения коэфициента мощности индукционных печей также собирают из плоскопрессованных секций, но между секциями оставляют большие промежутки, обеспечивающие циркуляцию масла в конденсаторе („масляные каналы"). Это обусловлено необходимостью улучшить отвод тепла, так как конденсаторы этого типа имеют рабочую частоту 10^3...10^4 Hz, а при такой частоте потери в бумажном конденсаторе резко увеличены. Иностранные фирмы применяют для таких конденсаторов искусственное охлаждение (фиг. 106). Системы наружного и вну-

треннего охлаждения дают одинаковый результат, позволяя повысить реактивную мощность конденсатора в 3 раза.

Резко улучшенные результаты дает система отвода тепла непосредственно от обкладок конденсатора, позволяющая увеличить реактивную мощность до 15 раз. При этой системе секции конденсатора разбиваются на две группы; у каждой группы один вывод изолирован, а второй присоединен к корпусу через охлаждающий змеевик, к которому припаивают обкладки [155]. Опытные образцы конден-



Фиг. 106. Системы охлаждения статических высокочастотных конденсаторов: a—наружное охлаждение; b—охлаждение пропитывающей жидкости внутри конденсатора; c—отвод тепла непосредственно от обкладок конденсатора.

Фиг. 107. Подвесной бумажно-масляный конденсатор высокого напряжения: 1—диафрагма для компенсации температурного расширения масла; 2—кольцо для выравнивания градиента напряжения; 3—фарфор; 4—масло; 5—конденсаторные секции

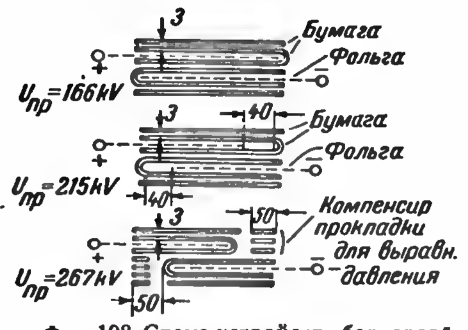
саторов с водяным охлаждением были изготовлены в СССР перед началом войны.

Конденсаторы, рассчитанные на непосредственное подключение к линии высоковольтной передачи и на работу при высоком напряжении технической частоты (конденсаторы связи, конденсаторы для защиты от перенапряжений, конденсаторы для емкостного отбора электроэнергии и т. п.), изготовляют в виде системы плоских последовательно соединенных секций, помещенных в фарфоровый корпус, закрываемый с торцов металлическими крышками.

Конденсаторы изготовляют подвесные (фиг. 107) и опорные [156—158]. Раньше в качестве таких конденсаторов применяли отрезки высоковольтного кабеля, согнутые в петлю и монтированные на железной раме (кабельные конденсаторы) [159]. Теперь такие конденсаторы не приме-

няют вследствие их большого габарита и недостаточной надежности в работе.

Бумажно-масляные конденсаторы, рассчитанные на работу при высоких значениях выпрямленного напряжения или при высоких импульсных напряжениях (рентгеновская аппаратура, импульсные генераторы), изготовляют из больших секций плоского типа, собранных вручную из листов кабельной бумаги и фольги (фиг. 90) [160].* Трудность изготовления этих конденсаторов обусловлена тем, что при постоянном токе нельзя применять принцип последовательного соединения секций с таким же успехом, как при переменном токе, а потому каждую секцию обычно рассчитывают на полное рабочее напряжение.



Фиг. 108. Схема устройств „барьеров" в высоковольтных конденсаторах постоянного тока

Для устранения поверхностного разряда приходится сильно увеличивать закраины, что вызывает большое увеличение размеров конденсатора. Уменьшения закраин можно достигнуть, применяя „барьеры" на пути поверхностного разряда (фиг. 108). Показанный на фиг. 109 высоковольтный конденсатор постоянного тока емкостью 0,15 μF при рабочем напряжении 100 kV не имеет барьеров. Применив барьеры, можно в этом же габарите повысить рабочее напряжение до 150 kV и емкость до 0,5...0,6 μF.

Конденсаторы, применяемые в фильтрах радиопередатчиков при рабочем напряжении до 5...10 kV выпрямленного тока, по конструкции подобны обычным статическим конденсаторам (фиг. 105). Для этой же цели при меньших рабочих напряжениях (а также для конденсаторных двигателей) применяют конденсаторы уменьшенного габарита в жестяных корпусах, крышки которых закрепляют закаткой краев (фиг. 110).

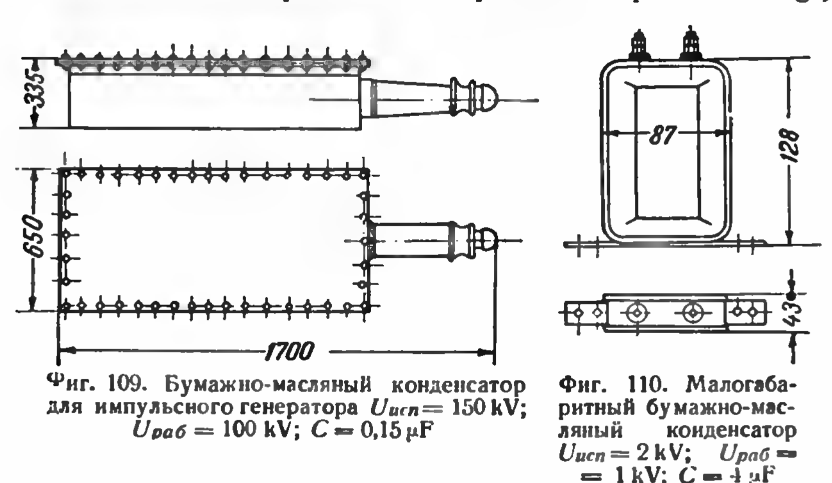
Для бумажных конденсаторов сильноточного типа с жидкой пропиткой стабильность и точность емкости не представляет такого интереса, как для конденсаторов с воскообразной пропиткой, применяемых в слаботочной аппаратуре. Обычный допуск по емкости составляет ±10%. В области

* В последние годы американские фирмы и для этих конденсаторов применили намотку секций на специальных многошпиндельных станках с автоматизированным управлением.

положительных температур емкость конденсаторов с жидкой пропиткой линейно снижается с температурой. Температурный коэфициент емкости зависит от типа пропиточной жидкости:

пропитка минеральным маслом дает $\alpha_t = -0{,}01\%$ на 1° С,
„ касторовым „ „ $\alpha_t = -0{,}07\%$ на 1° С,
„ соволом „ „ $\alpha_t = -0{,}05...0{,}08\%$ на 1° С.

В области отрицательных температур емкость бумажно-соволовых конденсаторов резко снижается; при температуре —20° С снижение емкости составляет 25% [161]. Снижение емкости сопровождается резким возрастанием tgδ,



Фиг. 109. Бумажно-масляный конденсатор для импульсного генератора $U_{исп} = 150$ kV; $U_{раб} = 100$ kV; $C = 0{,}15$ μF

Фиг. 110. Малогабаритный бумажно-масляный конденсатор $U_{исп} = 2$ kV; $U_{раб} = 1$ kV; $C = 4$ μF

поэтому при включении замороженного конденсатора под напряжение он саморазогревается и восстанавливает нормальное значение емкости и tgδ.

Такого же порядка снижение емкости на морозе дают и конденсаторы, пропитанные касторовым маслом. Конденсаторы, пропитанные минеральным маслом, дают заметное снижение емкости, порядка 10%, только при охлаждении до —50...60°С.

Сопротивление изоляции бумажно-масляных и бумажно-соволовых конденсаторов обычно составляет 500...5000 MΩ·μF. По последним рекламным американским данным, сопротивление изоляции бумажных конденсаторов с жидкой пропиткой составляет 20000...25000 MΩ·μF.

При пропитке касторовым маслом сопротивление изоляции несколько снижено.

Обычная норма по углу потерь для бумажных конденсаторов с жидкой пропиткой при технической частоте: tgδ ⩽ 0,005 (потери не более 0,5% от реактивной мощности).

Средние значения угла потерь отечественных конденсаторов обычно лежат ниже этой нормы.

Применение высокого вакуума при пропитке и отсутствие усадки пропиточной массы позволяют получать для конденсаторов с жидкой пропиткой весьма пологую кривую: $\mathrm{tg}\delta = f\,(U)$, вследствие сведения к минимуму количества воздушных включений. Этим объясняется высокая надежность работы бумажно-масляных и бумажно-соволовых конденсаторов в цепи переменного тока при высоком напряжении. При частотах свыше 10^4 Hz угол потерь бумажных конденсаторов резко возрастает, достигая при 10^5 Hz значения $\mathrm{tg}\delta = 0{,}05...0{,}06$ (потери 5...6% от kVAR); это ставит предел применению конденсаторов этого типа, заставляя переходить при частотах выше 10^4 Hz к применению слюдяных конденсаторов.

Электрическая прочность бумажных конденсаторов, пропитанных жидкими диэлектриками, резко повышена по сравнению с конденсаторами, имеющими воскообразную пропитку (фиг. 70).

Значение рабочей напряженности поля при технической частоте для этих конденсаторов принимают равным:

1) Конденсаторы большой емкости и низкого напряжения 7,5...10 $\frac{\mathrm{kV}}{\mathrm{mm}}$,
2) » » » и высокого » 15...20 $\frac{\mathrm{kV}}{\mathrm{mm}}$,

При кратковременном включении на постоянное напряжение допускают напряженность поля до 70 $\frac{\mathrm{kV}}{\mathrm{mm}}$, при длительном включении до 30...40 $\frac{\mathrm{kV}}{\mathrm{mm}}$.

При последовательном включении секций и рабочей частоте 50 Hz рабочее напряжение на каждую секцию принимают равным 1000...1500 $V_{эфф}$. При повышенной рабочей температуре допускаемое значение напряженности поля несколько снижается.

Для статических конденсаторов высокого напряжения при частоте 50 Hz и температуре 50° C (внутри конденсатора) следует брать не выше 10...12 $\frac{\mathrm{kV}}{\mathrm{mm}}$ при пропитке минеральным маслом; пропитка соволом позволяет при температуре 70° C повысить напряженность поля до 15 $\frac{\mathrm{kV}}{\mathrm{mm}}$ [162].

§ 51. Конденсаторы с диэлектриком из искусственных органических пленок

Для получения тонких пленок в виде длинных лент, пригодных для использования в конденсаторостроении,

прежде всего были использованы эфиры целлюлозы. Это название относят к группе веществ, полученных при обработке целлюлозы (клетчатки) спиртами или кислотами. В результате такой обработки получаются продукты, отличающиеся от исходной клетчатки плавкостью и растворимостью и позволяющие легко получать из них тонкие, прозрачные пленки, с хорошими электроизолирующими свойствами (табл. 12).

Наибольшее значение ε имеет ацетилцеллюлоза, поэтому этот эфир целлюлозы раньше других пытались применить

Таблица 12

Свойства пленок, полученных из эфиров целлюлозы

Характеристика	Название эфира целлюлозы			
	нитро-целлюлоза	ацетил-целлюлоза	бензил-целлюлоза	этил-целлюлоза
Диэлектрическая проницаемость ε	4...5	5...7	3...3,5	3...4
$tg\delta$ при 50 Hz	0,020	0,015	0,005	0,003
ρ_v в нормальных условиях, $\Omega \cdot cm$	10^{14}	10^{14}	10^{15}	10^{15}
То же при влажности 80%	10^{12}	$1,5 \cdot 10^{12}$	10^{14}	$2 \cdot 10^{14}$
$E_{пр}$ $\frac{kV}{mm}$, при 50 Hz	70...80	70...80	60...70	70...80
Гигроскопичность	Заметная	Заметная	Малая	Малая

в конденсаторном производстве. Ленты ацетилцеллюлозной пленки, под названием целлона, применяли для изготовления высоковольтных конденсаторов с рабочим напряжением от 2,5 до 20 kV; угол потерь этих конденсаторов при частоте 50 Hz составлял $tg\delta = 0,008...0,012$ [1]. Целлоновые конденсаторы не выдержали конкуренции с бумажно-масляными и быстро вышли из употребления. Попытка применить пленку ацетилцеллюлозного лака, нанесенную непосредственно на алюминиевую конденсаторную фольгу, для изготовления низковольтных конденсаторов [163] также не дала удачных результатов. Проводившиеся за границей и в СССР опыты по применению в производстве конденсаторов ацетилцеллюлозной пленки с увеличенной диэлектрической проницаемостью ($\varepsilon = 10...12$), обусловленной введением в пленку TiO_2, не привели пока к положительным выводам.

При настоящем состоянии техники пленки эфиров целлюлозы не могут конкурировать с бумагой, так как имеют повышенную по сравнению с ней стоимость, а в отношении

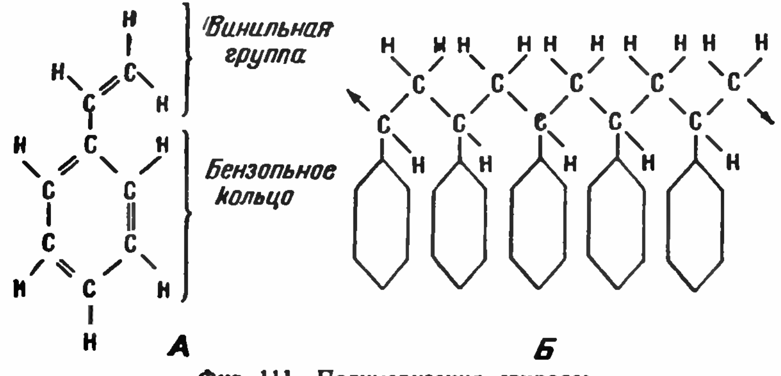
электрических свойств даже уступают хорошо пропитанной бумаге.

Более благоприятные результаты были получены при попытке применить в конденсаторостроении пленку полистирола.

Стирол представляет собой ароматический углеводород C_8H_8 (фиг. 111), имеющий вид бесцветной, слабо пахнущей жидкости, которая может быть получена рядом различных методов [164].

Стирол легко полимеризуется, превращаясь в твердую прозрачную массу — полистирол, обладающую очень высоким удельным сопротивлением и весьма малым углом потерь.

Из полистирола можно получать пленки путем отливки полистирольного лака на стеклянную пластинку. В послед-



Фиг. 111. Полимеризация стирола:
А — молекула стирола; *Б* — молекула полистирола

ние годы был разработан специальный метод машинного получения полистирольных пленок, механически прочных и гибких, толщиной до 0,01 mm. Эти пленки получили название „стирофлекса" и имеют следующие характеристики:

диэлектрическая проницаемость	2,4...2,6
$tg\delta$ при частотах $10^3...10^6$Hz	0,0002
удельное объемное сопротивление . . .	$10^{17}...10^{18}$ $\Omega\cdot$cm
электрическая прочность при 50 Hz . .	100 $\frac{kV}{mm}$

Иностранные фирмы изготовляют стирофлексные конденсаторы емкостью от нескольких сотен μμF до нескольких μF при рабочем напряжении 100...300 V постоянного тока [165]. Конденсаторы изготовляют намоткой, как бумажные конденсаторы, и по конструкции они подобны последним; конденсаторы малой емкости собирают в картонных трубках, а конденсаторы большой емкости — в прямоугольных металлических корпусах.

Во время войны германские фирмы изготовляли стирофлексные конденсаторы в корпусах герметизированной конструкции. Конденсатор типа „Стироконд" емкостью 10 μF при рабочем напряжении 100 V пост. тока имеет удельный объем 118 $cm^3/\mu F$.

Стирофлексные конденсаторы дороже бумажных, но обладают по сравнению с последними резко сниженным углом потерь ($tg\delta < 0{,}0005$) и увеличенной точностью и стабильностью емкости.

Обычно допуск по емкости для этих конденсаторов равен ±0,5...1%.

Температурный коэфициент емкости стирофлексных конденсаторов $\alpha_t = -0{,}010...0{,}020\%$ на 1° C. В ряде случаев, где важно иметь малый $tg\delta$, а стабильность емкости имеет второстепенное значение, стирофлексные конденсаторы могут заменять слюдяные. Верхний предел рабочей температуры стирофлексных конденсаторов +50...60° C [165]; это объясняется тем, что для вытеснения воздуха из зазоров между стирофлексом и фольгой конденсаторы пропитывают парафином. Сам по себе стирофлекс допускает нагрев до более высоких температур. В последних иностранных образцах вместо пропитки парафином применена термическая обработка конденсаторов путем прогрева при 90° C.

Применяя сочетание полистирола ($\alpha_t = -100...200 \cdot 10^{-6}$ на 1° C) со слюдой ($\alpha_t = +20...30 \cdot 10^{-6}$ на 1° C), можно получить конденсаторы с пониженным температурным коэфициентом емкости. В США изготовляют полистирольно-слюдяные конденсаторы, применяя последовательное соединение слоев: слюдяная пластинка покрывается слоем стирольного лака, поверх которого (после полимеризации стирола) распылением наносят обкладки (свинцово-оловянный сплав). Емкость конденсаторов — до 100 μμF с допуском ±10%; температурный коэфициент емкости $\alpha_t = \pm 0{,}0004...0{,}0012\%$ на 1°C. В СССР были проведены удачные опыты по изготовлению аналогичных конденсаторов, причем применялось как последовательное, так и параллельное соединение слоев слюды и полистирола.

В 1943 г. фирма Дженерал Электрик (США) сообщила о выпуске нового типа конденсаторов с диэлектриком из искусственной органической пленки „Лектрофильм". Эта пленка имеет следующие свойства: $\varepsilon = 4...4{,}5$; $\alpha_t = 0{,}05...0{,}15\%$ на 1° C; $tg\delta = 0{,}020...0{,}035$ при 25° C и 1 MHz; $U_{пр} = 75...100\ \frac{kV}{mm}$; $t_{раб.\ max} = 100...125°C$. Конденсаторы с такой пленкой предназначаются для замены слюдяных блокировочных конденсаторов [57б; 165а].

В 1946 году фирма Конденсер Продэктс начала выпуск пленочных конденсаторов типа „пластикон“ $U_{раб}=$ $=600\ldots10\,000$ V, емкость до $1\ldots8\,\mu$F, рассчитанных на работу при постоянном токе; эти конденсаторы начинают конкурировать с бумажными.

Глава V

ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИЕ КОНДЕНСАТОРЫ

§ 52. Особенности электролитических конденсаторов

В электролитическом конденсаторе диэлектриком является оксидная пленка, нанесенная на алюминиевой пластине, служащей первой обкладкой конденсатора; второй обкладкой служит слой электролита, соприкасающийся с оксидной пленкой. Наличие электролита в жидком или полужидком состоянии является необходимым условием для получения высокой электрической прочности; если в качестве второй обкладки взять металл, соприкасающийся с оксидной пленкой, то электрическая прочность падает до незначительной величины. Оксидная пленка обладает малой толщиной; толщину этой пленки можно снижать в соответствии с рабочим напряжением, сколь бы мало оно ни было (вплоть до 1 V). Это дает возможность получать очень высокие значения удельной емкости, особенно при малых рабочих напряжениях. Вместе с тем в настоящее время повысить рабочее напряжение оксидного слоя выше 500...600 V не удается, что заставляет при более высоких напряжениях прибегать к последовательному соединению секций, связанному в этом случае с рядом больших неудобств.

Оксидная пленка обладает униполярной проводимостью; для приобретения высокой электрической прочности и достаточно большого удельного сопротивления пленки на алюминиевую пластину должен быть подан положительный потенциал (анодное включение). Это обстоятельство обусловливает полярность обычного электролитического конденсатора. Несоблюдение полярности (катодное включение) приводит такой конденсатор к гибели вследствие перегрева большим током.

Основными преимуществами электролитических конденсаторов являются малый габарит и малый вес; дешевизна (сниженная стоимость на единицу емкости); неограниченный нижний предел рабочего напряжения, применительно к которому может быть изготовлен конденсатор; исключительно большие номинальные значения емкости при малых рабочих напряжениях, доходящие до значения в 1 F [166].

Основными недостатками электролитических конденсаторов являются:

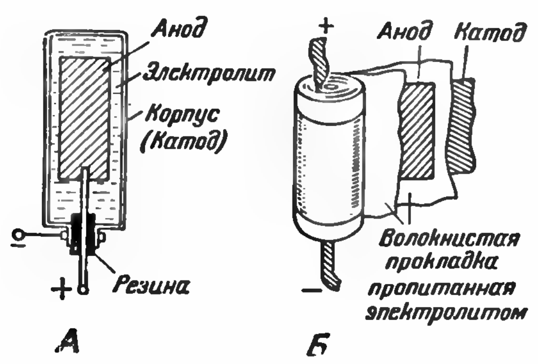
недостаточная стабильность емкости во времени и при колебаниях температуры;

высокий угол потерь и низкое сопротивление изоляции;

ограниченный верхний предел рабочего напряжения;

полярность (у обычного типа).

В настоящее время электролитические конденсаторы изготовляют с номинальной емкостью от 0,5...1 μF до 2000...10 000 μF и выше для рабочего напряжения от 1...2 V до 500...600 V постоянного тока. В отдельных случаях изготовляют конденсаторы с рабочим напряжением до 3...5 kV, собранные из последовательно соединенных секций. По конструкции и методу изготовления различают два основных типа электролитических конденсаторов (фиг. 112) [180]:



Фиг. 112. Схема устройства электролитических конденсаторов:
А — мокрый конденсатор; Б — сухой конденсатор

1) Мокрые или жидкостные, в которых алюминиевый анод погружен в жидкий или слабовязкий электролит.

2) Сухие или полусухие, изготовляемые сворачиванием оксидированной (анод) и неоксидированной (катод) фольги, разделенных волокнистой прокладкой, пропитанной вязким или полутвердым электролитом.

Наряду с обычными электролитическими конденсаторами в последние годы начали изготовлять неполярные конденсаторы, допускающие включение в цепь постоянного тока без соблюдения полярности и выдерживающие кратковременное включение в цепь переменного тока.

§ 53. Природа оксидной пленки

По вопросу о природе и строении оксидной пленки и о причинах, обусловливающих ее униполярную проводимость, различными исследователями было высказано много различных предположений [167—172].

Практические работники современного иностранного конденсаторостроения [2; 173], не вдаваясь в детали строения пленки, объясняют большую проводимость оксидного слоя при катодном включении холодной эмиссией электронов из алюминия. Для того чтобы могло существовать явление эмиссии электронов из холодного металла, у поверхности последнего должна быть создана напряженность поля порядка $10^7 \frac{V}{cm}$. В случае электролитического конденсатора активная толщина оксидного слоя составляет около 10^{-5} cm, что при небольших напряжениях дает величину напряженности, достаточную для создания холодной эмиссии. При анодном включении алюминиевой пластины, т. е. при подаче отрицательного потенциала на электролит, эмиссия электронов резко затруднена тем, что они связаны с ионами электролита. Небольшой ток утечки при анодном включении обусловлен только теми электронами, которые отрываются от ионов электролита.

Фиг. 113. Три стадии образования оксидной пленки из гидроокиси алюминия по Лилиенфельду

Глубокая теория строения оксидного слоя, позволяющая полностью объяснить всю сложную совокупность явлений, наблюдаемых в электролитических конденсаторах, еще не создана и может возникнуть только на основе дальнейшего углубленного изучения оксидных пленок на алюминии.

По вопросу химической природы оксидной пленки также был высказан ряд предположений. Этот слой полагали состоящим:

1) из чистой кристаллической окиси алюминия Al_2O_3,
2) из гидроокиси алюминия: $Al_2O_8 \cdot H_2O$ или $Al_2O_3 \cdot 2H_2O$,
3) из гидрата окиси алюминия: $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$ или $2Al(OH)_3$.

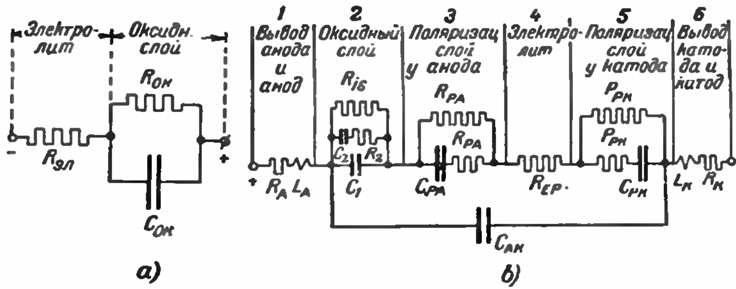
По мнению Лилиенфельда [174], исходным образованием является гидроокись $Al_2O_3 \cdot 2H_2O$. Воздействие сильного электрического поля приводит к образованию длинных цепочек, полученных за счет отщепления молекул воды при объединении нескольких молекул гидроокиси (фиг. 113).

Поэтому оксидная пленка представляет собой окись алюминия с небольшой степенью гидратации, обусловленной наличием гидроксильных групп OH на концах длинных молекулярных цепочек.

Хотя теория оксидной пленки, с физической и химической точки зрения, обработана еще не до конца, практика изготовления электролитических конденсаторов достигла за последние годы больших успехов.

§ 54. Схема, эквивалентная электролитическому конденсатору

В электролитическом конденсаторе имеют место более сложные явления, чем в обычных конденсаторах с твердым диэлектриком. Поэтому при исследовании этого конденсатора вместо простейших эквивалентных схем (фиг. 10—11, § 15) необходимо применять более сложные (фиг. 114). В первом приближении можно применить простую параллельно-последовательную схему; параллельно соединенные C_{ok} и R_{ok} представляют собой емкость оксидного слоя



Фиг. 114. Схема, эквивалентная электролитическому конденсатору: *a*—упрощенная; *b*—полная

и потери, обусловленные током утечки; последовательно включенное сопротивление $R_{эл}$ изображает сопротивление слоя электролита в мокром конденсаторе или сопротивление волокнистой прокладки, пропитанной электролитом, в сухом конденсаторе.

Эта упрощенная схема приблизительно изображает поведение конденсатора в области звуковых частот. Для того чтобы охватить широкую область частот от постоянного тока до ультракоротких волн, надо применить усложненную схему, состоящую из шести участков [175].

В случае неполярных электролитических конденсаторов, содержащих два анода, в данную эквивалентную схему надо добавить еще один участок, аналогичный участку 2 и изображающий второй оксидный слой.

§ 55. Аноды и катоды электролитических конденсаторов

Для изготовления анодов, т. е. пластин, покрываемых оксидной пленкой, в настоящее время применяют только алюминий; тантал, применявшийся ранее некоторыми фир-

мами, вышел из употребления ввиду его дороговизны. Анодный алюминий должен быть высокой степени частоты (99,8...99,9% Al); иностранные фирмы изготовляют еще более чистый алюминий (99,95...99,99% Al); впрочем применение столь чистого алюминия ограничивается его повышенной стоимостью, хотя он и дает возможность дополнительно улучшить электрические характеристики конденсаторов. Кроме того, чрезмерно повышенная чистота алюминия затрудняет травление, применяемое для увеличения удельной поверхности анодов.

Наиболее опасной примесью является железо, которое создает в отдельных местах оксидной пленки проводящие участки из Fe_2O_3. При содержании железа 1% нанести оксидную пленку на анод совершенно не удается. Снижение содержания железа и других примесей в анодном алюминии позволяет ускорить процесс нанесения оксидного слоя (процесс формовки анода), снизить расход электроэнергии, потребляемой во время этого процесса, и уменьшить ток утечки готовых конденсаторов [176].

Вследствие малой толщины оксидного слоя, удельная емкость анода, рассчитанная на единицу площади, зависит не только от толщины слоя, но и от состояния поверхности анода. Искусственное увеличение поверхности анода при заданной его площади позволяет поэтому заметно увеличить емкость конденсатора [173; 177—179].

Для получения повышенной удельной емкости применяют следующие методы обработки анодов:

А. Механическая обработка:

1) отбивка песком,
2) царапанье металлической щеткой,
3) прокатка на медных вальцах с абразивом,
4) прокатка на фигурных стальных вальцах.

Механическая обработка дает увеличение удельной емкости в 2...2,5 раза по сравнению с гладким анодом; недостатками этой обработки являются: увеличение хрупкости анода и трудность удаления частиц металла или абразива, пристающих к поверхности анода в процессе обработки.

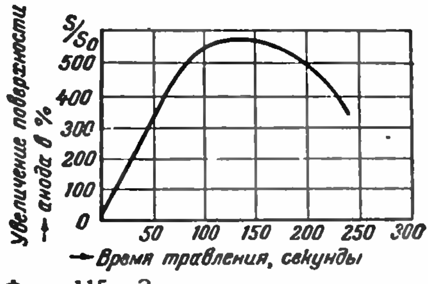
Б. Химическая обработка травлением анода в растворах, разъедающих алюминий:

1) HCl при 65...75° C в течение 3...5 минут,
2) $HCl + CuCl_2$ при 60...75° C в течение 3...5 минут,
3) $HCl + HNO_3$ при 90...95° C в течение 5...10 минут.

До кислотного травления производят протравку анода в 3% растворе NaOH для удаления жировых загрязнений и естественной оксидной пленки с поверхности анода. При кислотном травлении чрезмерная длительность процесса приводит к разрушению верхушек неровностей, образую-

щихся на аноде, и дает уменьшение удельной емкости по сравнению с оптимальным ее значением (фиг. 115).

Химической обработкой можно получить увеличение удельной емкости до 6...7 и даже до 10 раз. Практически ограничиваются увеличением удельной емкости в 3...4 раза. Дальнейшее увеличение $C_{уд}$ требует применения чрезмерной глубины травления, связанной с необходимостью увеличивать толщину анода и затрудняющей отмывку ионов хлора, остающихся в порах после травления. Эти ионы весьма опасны для конденсатора, так как вызывают коррозию анода.



Фиг. 115. Зависимость увеличения поверхности анода от времени травления (Мак Найт Дили)

Химический метод обработки анодов прост и дает значительное повышение удельной емкости; поэтому его широко применяют на практике (табл. 13).

Таблица 13

Практические режимы травления анодов для увеличения анодной поверхности [181]

Состав травильного раствора				Время травления, минут	Температура, °С	Увеличение поверхности
H_2O	HCl	HNO_3	$CuCl_2$			
1000 см³	150 см³	100 см³	—	6...10	85...90	3...4
1000 см³	200 см³	—	0,01%	3...6	60...65	4...6*

* При работе с этим режимом требуется промывка протравленного анода в 50% HNO_3 для удаления меди, высадившейся на поверхности. Состав указан для значений плотности: HCl—1,18 и HNO_3—1,40.

Для ускорения травления иногда применяют введение дополнительной разности потенциалов (электрохимическая обработка).

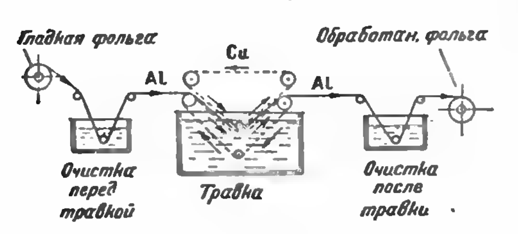
Для этой цели в установку для травления непрерывным методом вводят две медные ленты, соприкасающиеся с анодной фольгой, проходящей через травильную ванну (фиг. 116). Разность потенциалов создается за счет контакта алюминия с медью. При травлении раствором 20% HCl при +40° С этот метод позволяет снизить время травления до 1 минуты. При увеличении времени травления электрохимический метод

позволяет снизить концентрацию и температуру травильного раствора, что уменьшает вредность этой работы [173].

Повышение удельной емкости анода путем увеличения его поверхности травлением позволяет резко снизить объем и вес электролитических конденсаторов (до 4...6 раз) [181].

В производстве сухих конденсаторов аноды изготовляют из алюминиевой фольги толщиной 0,05...0,10 mm. Аноды мокрых конденсаторов изготовляют из фольги 0,1...0,2 mm, иногда для этих конденсаторов применяют литые аноды, проволочные аноды и т. д.

В последнее время некоторые американские фирмы добились дальнейшего резкого увеличения удельной емкости анодов путем замены алюминиевой фольги алюминизированной тканью [182]. Для этой цели применяют льняную ткань (марлю), тщательно отмытую от следов хлора и покрытую слоем рафинированного алюминия, нанесенного механическим распылением (метод Шоопа). При этом получают пористый анод с резко увеличенной поверхностью.



Фиг. 116. Схема непрерывного травления анодной фольги электрохимическим методом

По сравнению с гладкими анодами удельная емкость увеличивается в 20 раз для низковольтных конденсаторов и в 10 раз для высоковольтных (рабочее напряжение более 100 V). Меньшее возрастание $C_{уд}$ для высоковольтных конденсаторов объясняется повышенной толщиной оксидного слоя и некоторым выравниванием поверхности при увеличенном напряжении формовки. Удачные опыты по изготовлению конденсаторов такого типа проводят и наши исследователи [202].

В сухих конденсаторах в качестве катодов, т. е. неоксидированных пластин (фиг. 112), применяют алюминиевую фольгу толщиной 0,04...0,06 mm, изготовляемую из алюминия с содержанием примесей, повышенным по сравнению с анодным алюминием (99,0...99,3% Al).

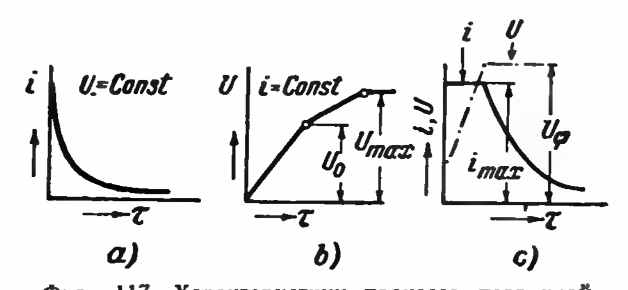
Второй обкладкой в сухом конденсаторе служит электролит, которым пропитана волокнистая прокладка; катод используется только как средство для подвода тока к электролиту.

В мокрых конденсаторах роль катода играет корпус; некоторые фирмы делают его из меди, но в большинстве случаев корпус изготовляют из технического алюминия.

Большая переменная составляющая напряжения, приложенная к мокрому конденсатору, может привести к образованию оксидного слоя на катоде. Емкость этого слоя включается последовательно с емкостью оксидного слоя на аноде и снижает общую емкость конденсатора. Для уменьшения вредного эффекта заформовки алюминиевых корпусов их подвергают травлению, увеличивающему удельную емкость катода, что ослабляет влияние емкости катодного слоя на емкость конденсатора. Еще лучший результат получается при хромировании алюминиевых корпусов, которое исключает возможность заформовки стенок корпуса.

§ 56. Процесс формовки анодов

Процесс создания оксидного слоя на поверхности анодной алюминиевой пластины, проводящийся электролитическим путем, носит название формовки (первичная формовка



Фиг. 117. Характеристики процесса первичной формовки:
a — формовка при постоянном напряжении на ванне; *b* — формовка при постоянной плотности тока; *c* — смешанная формовка

анодов). Анодную пластину помещают в ванну, наполненную электролитом, и к ней присоединяют положительный полюс источника энергии постоянного тока; отрицательный полюс присоединяют к стенкам ванны, если она металлическая, или к металлической пластине (катоду), подвешенной в ванне возле анодной пластины, если ванна изготовлена из керамики или иного непроводящего материала. При таком включении у поверхности анодной пластины выделяется кислород, который и производит окисление алюминия, образуя оксидный изолирующий слой.

Если в процессе формовки поддерживать напряжение на ванне постоянным (фиг. 117), то вследствие образования оксидного слоя сопротивление ванны увеличивается и сила тока снижается сначала быстро, потом замедленно. Если же поддерживать постоянной силу тока, то вследствие увеличения сопротивления ванны потребуется непрерывно

повышать напряжение, приложенное к ванне. Напряжение будет нарастать линейно до значения U_0, называемого искровым напряжением. При этом значении на аноде начинают проскакивать отдельные мелкие искры. Дальнейшее нарастание напряжения также проходит линейно, но с меньшей скоростью, до значения U_{max}, называемого максимальным напряжением формовки. При этом значении напряжения вся поверхность анода покрывается крупными искрами, и дальнейшее увеличение напряжения оказывается невозможным.

Природа искрообразования на аноде сводится к нагреву тонких каналов в оксидном слое; нагрев канала прерывается с образованием газового пузырька, обусловленного нагревом или электролизом. При напряжениях выше 340 V происходит пробой газовых пузырьков, увеличивающий выделение тепла и усиливающий газовыделение. Растущий пузырек обрывает искру, а затем резко сокращается в объеме. Этим объясняется характерное потрескивание при искрении на аноде [170]. Качество оксидного слоя снижается при искрении, а потому формовочное напряжение $U_ф$ надо брать ниже искрового U_0. Для повышения U_0 надо уменьшать концентрацию электролита и подбирать такую рецептуру электролита, которая меньше растворяет алюминий.

В качестве формовочного электролита теоретически можно взять чистую воду, которая при электролизе дает выделение кислорода у анода. Для увеличения проводимости к воде добавляют те или другие соли или берут раствор слабой кислоты и слабой щелочи с таким расчетом, чтобы получить реакцию, близкую к нейтральной. В США в качестве формовочного электролита обычно применяют раствор борной кислоты H_3BO_3 и буры $Na_2B_4O_7$ (табл. 14).

Таблица 14

Рецептуры формовочных электролитов [173]

H_2O, cm³	H_3BO_3, G	$Na_2B_4O_7$, G	$U_ф$, V	Примечание
100	15	0	650...700	мокрые конденсаторы
100	15	0,12	550...600	„
100	15	0,25	500...525	„
100	15	0	600...800	сухие конденсаторы
100	10	0,12	525...600	„
100	10	0,25	450...525	„
100	10	0,30	350...450	„
100	10	1	150...350	„
100	10	1,5	50...150	„
100	10	2	10... 50	„

При формовочном напряжении ниже 100 V удовлетворительные результаты были получены при работе с децинормальным раствором углекислого аммония $(NH_4)_2CO_3$.

Для формовки высоковольтных конденсаторов с успехом применяли раствор лимонной кислоты, молибдата аммония и аммиака [183], а также растворы борной кислоты и аммиака или борной кислоты и пентабората аммония.

Основными характеристиками формовочного электролита являются концентрация водородных ионов pH и удельное сопротивление ρ.

Величина pH представляет собой логарифм концентрации водородных ионов, взятый с обратным знаком. Для чистой дистиллированной воды $pH = 7$; при $pH > 7$ электролит дает щелочную реакцию, а при $pH < 7$ — кислую. Для формовки оптимальные результаты дают электролиты со слабой кислой реакцией: $7 > pH > 4...5$.

Величина удельного сопротивления определяет величину U_0 [173]:

$$U_0 = a \lg\rho + b, \tag{67}$$

где a и b — постоянные коэфициенты.

При уменьшении концентрации электролита увеличивается ρ, а следовательно и U_0, но при этом возрастает сопротивление ванны, что затрудняет создание достаточно высокой плотности тока при формовке и замедляет этот процесс.

Поэтому повышение U_0 до таких значений, которые позволили бы формовать аноды с рабочим напряжением выше 500...600 V, представляет практически непреодолимые трудности.

Понижение удельного сопротивления ρ достигается повышением концентрации электролита; при этом увеличивается количество эмиттируемых на анод электронов из электролита, что приводит к снижению U_0 в соответствии с уменьшением ρ.

Толщина оксидного слоя в первом приближении пропорциональна напряжению формовки $U_ф$; поэтому удельная емкость должна быть обратно пропорциональна величине $U_ф$ или иначе:

$$C_{уд} \cdot U_ф \approx k, \tag{68}$$

где $C_{уд}$ в $\mu F/cm^2$ (рассчитано на обе стороны поверхности анода), $U_ф$ в V и $k = 5...7 \ \frac{\mu F \cdot V}{cm^2}$ (для гладких анодов).

Фактически при уменьшении формовочного напряжеиия величина k не остается постоянной, а несколько снижается. Так, при формовке гладких анодов было получено [184]:

при $U_ф = 16$ V, $k = 4,47 \frac{\mu F \cdot V}{cm^2}$, а при $U_ф = 600$ V, $k = 6,0 \frac{\mu F \cdot V}{cm^2}$.

Для низковольтных конденсаторов, а также для высоковольтных конденсаторов с травлеными анодами, вместо расчета $C_{уд}$ по формуле (68) лучше определять ее непосредственным экспериментом.

При выборе величины формовочного напряжения надо исходить из соотношения: $U_{раб} < U_ф < U_0$.

При увеличении $U_ф$ по отношению к $U_{раб}$ увеличивается толщина пленки и уменьшается ток утечки конденсатора, но зато снижается $C_{уд}$, что приводит к увеличению габарита конденсаторов и к перерасходу материалов; поэтому следует брать $U_ф$ возможно ближе к $U_{раб}$.

В настоящее время обычно берут формовочное напряжение на 10...15% выше рабочего в случае высоковольтных конденсаторов ($U_{раб} > 100...150$ V) и на 25...50% выше рабочего для низковольтных конденсаторов.

Если в условиях работы на конденсатор, при заданном значении рабочего напряжения постоянного тока $U_{раб}$, накладывается значительная переменная составляющая $U_{эфф}$, то формовочное напряжение надо брать больше, чем $U_{раб} + 1,41\, U_{эфф}$.

Процесс формовки анодов можно вести двумя различными методами: статическим и динамическим.

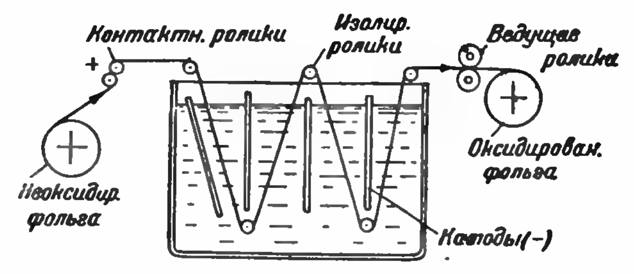
При статической формовке производят оксидирование отдельных анодных пластин, которые подвешивают в формовочной ванне обычно по нескольку штук сразу. Для того чтобы избежать чрезмерного толчка тока при включении, к ванне сначала подводят пониженное напряжение; затем увеличивают его, поддерживая плотность тока в ванне постоянной до тех пор, пока не будет достигнуто значение $U_ф$.

Дальше напряжение сохраняет постоянное значение, а сила тока в ванне постепенно падает (фиг. 117). Американские фирмы применяют значение начальной плотности тока для гладких анодов $2,5...3,5 \frac{mA}{cm^2}$ и для травленых анодов $5...8 \frac{mA}{cm^2}$. Плотность тока в конце формовки составляет для гладких анодов $8 \frac{\mu A}{cm^2}$ и для травленых $16 \frac{\mu A}{cm^2}$. Продолжительность формовки 1...1,5 часа; при очень чистом алюминии 0,5 часа [173].

Статическую формовку применяют теперь преимущественно только для анодов мокрых конденсаторов; аноды

сухих конденсаторов формуют этим методом только при небольшом масштабе производства. Недостатками статической формовки являются: неравномерность загрузки источника электроэнергии, питающего ванну и трудность получения высоких плотностей тока при формовке. Последнее приводит к увеличенной длительности процесса, так как скорость формовки возрастает с увеличением плотности тока [185].

При динамической формовке производят оксидирование длинной ленты анодной фольги, непрерывно движущейся через формовочную ванну (фиг. 118).



Фиг. 118. Динамическая формовка анодной фольги

Наибольшая плотность тока создается на месте входа фольги в ванну, а дальше снижается вследствие образования на фольге оксидного слоя. В начальном участке, у входа, легко создать высокую плотность тока, и этим резко ускорить процесс формовки (до 10...20 раз по сравнению со статической формовкой). Для вычисления плотности тока на месте входа фольги в электролит можно воспользоваться формулой [186]:

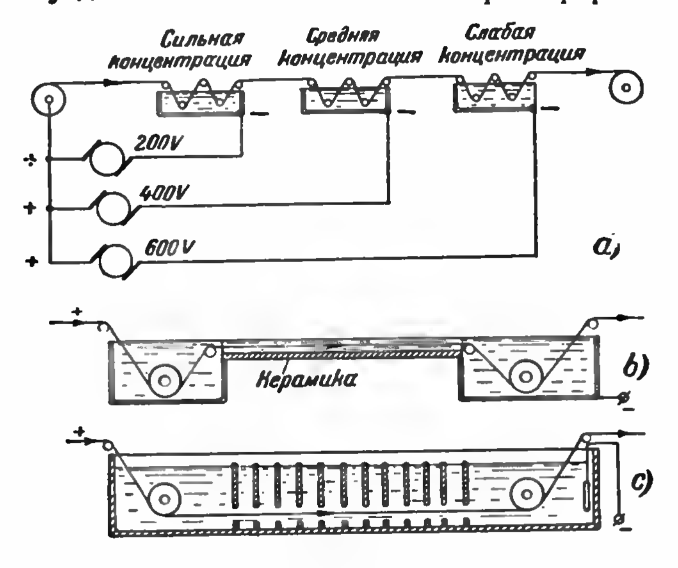
$$j_{max} = \frac{I}{2b\left(\frac{v}{0,3} + 0,025\,l\right)}, \quad (69)$$

где I — сила тока в ванне в A; v — скорость движения фольги в cm/sec; b — ширина фольги в cm; l — длина фольги в ванне в cm.

Сила тока I, а следовательно, и j_{max} зависит от скорости движения фольги; при $v = 0,25...0,5$ m/min можно легко получить $j_{max} = 0,1...0,2 \frac{A}{cm^2}$, т. е. много выше, чем при статической формовке. При $v > 0,5$ m/min делается опасным перегрев в месте входа фольги в ванну, особенно при высоком напряжении формовки ($U_ф = 600...800$ V). Для ослабления перегрева стремятся уменьшить разность потенциалов между фольгой и электролитом у места входа фольги, применяя формовку в нескольких ваннах с возрастающим

напряжением формовки или искусственно увеличивая падение напряжения в электролите изменением конфигурации ванны или изменением сечения пути тока в ванне при помощи перегородок (фиг. 119) [187].

Применение динамической формовки дает резкое ускорение процесса и хорошее использование установленной мощности источника электроэнергии (вследствие равномерной загрузки); этот способ формовки выгодно применять, когда масштабы производства оправдывают расходы на установку динамической ванны. Некоторые фирмы начали



Фиг. 119. Различные методы снижения разности потенциалов у входа фольги в ванну:
a — применение нескольких ванн (ступенчатая формовка); *b* — снижение сечения средней части ванны; *c* — введение в ванну перегородок

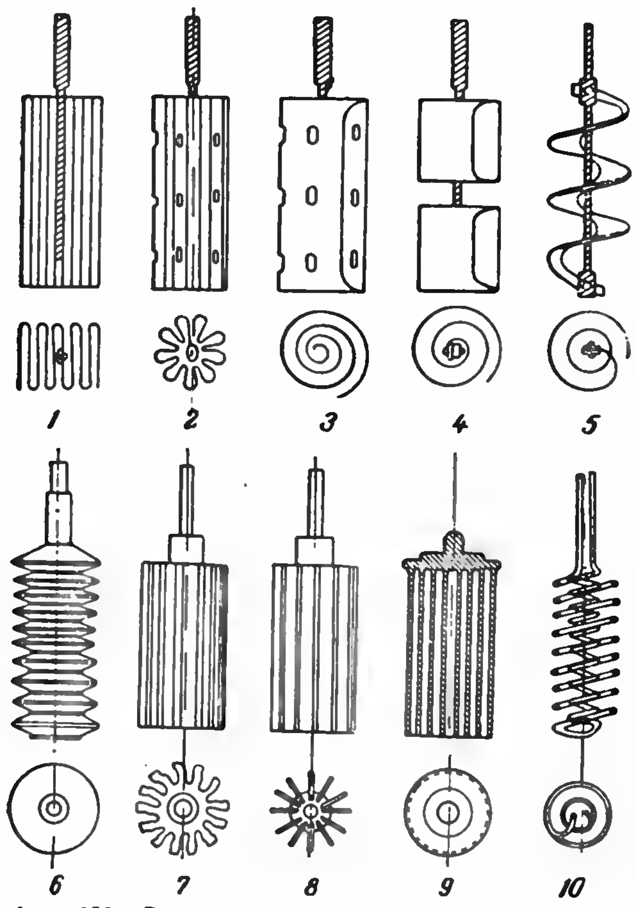
применять этот метод формовки даже для анодов мокрых конденсаторов, требующих проведения процесса формовки уже после сборки анода; в этом случае аноды подвешивают к транспортеру, который несет их над ванной, постепенно погружая в нее, а затем извлекает их из электролита в заформованном виде.

Процесс формовки требует соблюдения исключительной чистоты: вода для растворения химикалий должна быть дважды дистиллированной; химикалии должны быть химически чистыми; анодная фольга должна быть тщательно обезжирена и промыта, особенно если она подвергалась травлению для увеличения удельной емкости; сама ванна требует систематической очистки и промывки.

Особенно вредным загрязнением является хлор. Следы хлора уже в количестве 0,002...0,003% заметно замедляют формовку и ухудшают качество оксидного слоя [185].

§ 57. Мокрые конденсаторы

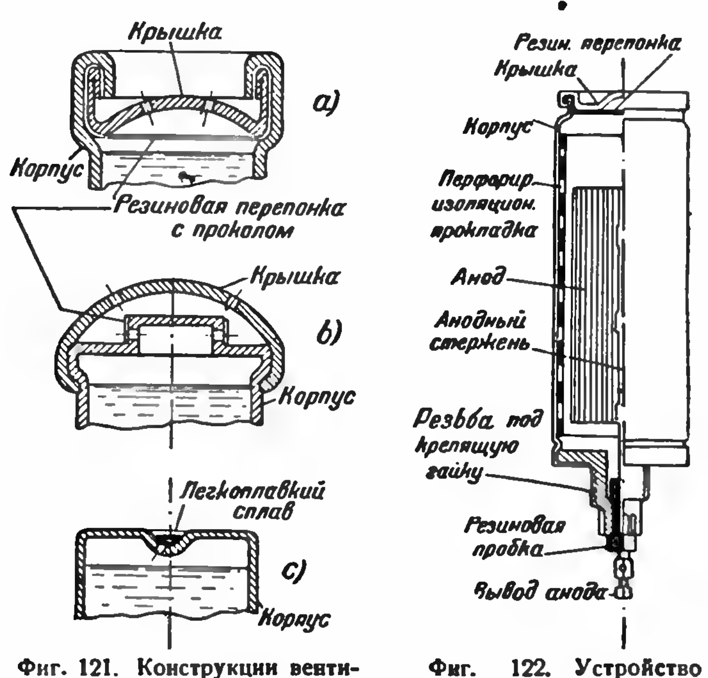
Для уменьшения габарита мокрых конденсаторов анодной фольге придают форму гармоники или спирали (фиг. 120);



Фиг. 120. Различные варианты конструкции анодов в мокрых конденсаторах:
1—5—аноды из фольги; *6—9*—массивные аноды; *10*—проволочный анод

иногда применяют массивные литые аноды с продольными или поперечными прорезами и проволочные аноды. В случае спирального анода из фольги, в последней пробивают отверстия, чтобы уменьшить длину пути тока от стенок корпуса (катода) к внутренним виткам анода и этим умень-

шить сопротивление слоя электролита и снизить угол потерь конденсатора. Анодную фольгу приклепывают к алюминиевому стержню; стержень и заклепки изготовляют из алюминия такой же степени чистоты, которую имеет анодная фольга. Формовку анодов ведут уже в собранном виде, обычно статическим методом. Отформованный анод помещают в корпус, пропуская конец стержня через резиновую пробку, вставленную в головку корпуса. Закрепление



Фиг. 121. Конструкции вентилей в мокрых конденсаторах: *a* и *b*—резиновая перепонка с проколом; *c*—заливка легкоплавким сплавом

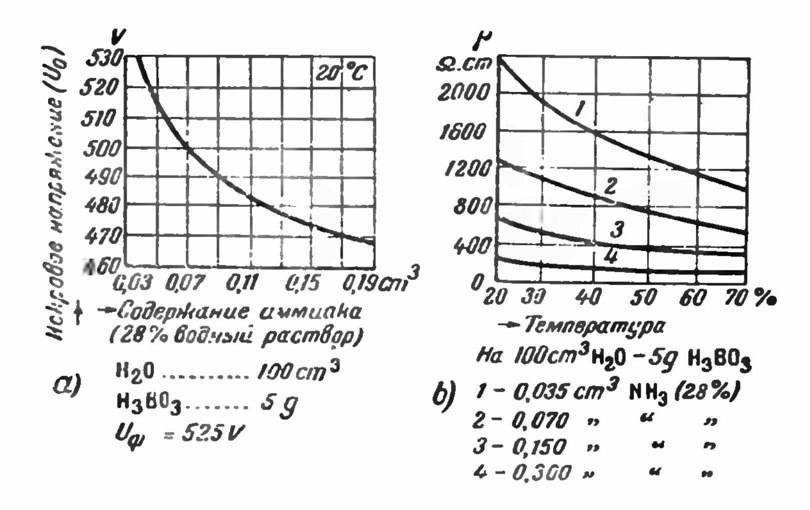
Фиг. 122. Устройство мокрого электролитического конденсатора

стержня производят гайкой, под которую прокладывают резиновую шайбу, или обжатием головки корпуса и закаткой. После заливки в конденсатор электролита верхний торец корпуса закрывают крышкой, которую закрепляют закаткой. В крышке должен быть предусмотрен вентиль (клапан для выхода газов из конденсатора); обычно вентиль представляет собой резиновую перепонку, в которой сделан прокол иголкой (фиг. 121).

При перевертывании конденсатора электролит не вытекает через проколотое отверстие, но если в рабочих условиях в конденсаторе образуются газы, то перепонка растягивается, отверстие расширяется, и газы выходят из конденсатора. Резиновая перепонка с проколом может быть

заменена отверстием, залитым легкоплавким сплавом; при перегреве конденсатора и усилившемся газообразовании сплав плавится, и газ проходит через него наружу [188].

Если анод конденсатора изготовлен из фольги, то, во избежание соприкосновения анода со стенками корпуса, вдоль стенок прокладывают перфорированную прокладку из тонкого эбонита или целлюлоида (фиг. 122). Для того чтобы не вызвать этим резкого возрастания $tg\delta$, необходимо, чтобы суммарная площадь отверстий в прокладке была бы не менее 25% всей поверхности прокладки.



Фиг. 123. Характеристики рабочего электролита мокрых конденсаторов:

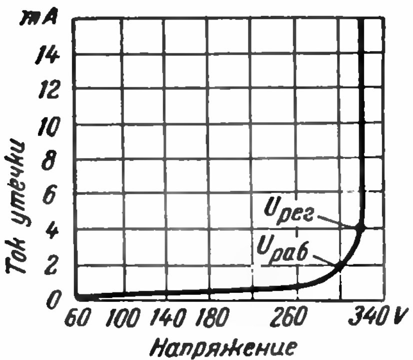
а) – зависимость искрового напряжения от содержания аммиака; *в*) – зависимость удельного сопротивления от температуры при разном содержании аммиака (Мак Найт Дили)

В качестве рабочего электролита, заливаемого в конденсатор, может быть использован тот же электролит, в котором велась формовка, т. е. раствор буры и борной кислоты. При этом необходимо, чтобы корпус конденсатора был изготовлен из меди. При алюминиевых корпусах в качестве рабочего электролита применяют раствор борной кислоты и аммиака. При заданном содержании борной кислоты увеличение содержания аммиака: NH_3 уменьшает удельное сопротивление электролита ρ и снижает угол потерь конденсатора, но одновременно снижается и искровое напряжение согласно формуле (67). С другой стороны, при уменьшении содержания NH_3 усиливается зависимость ρ от температуры (фиг. 123). Поэтому содержание NH_3 подбирают так, чтобы получить минимальное возможное значение ρ при $U_0 > U_{раб}$.

Водный раствор замерзает при 0° C; это сопровождается резким возрастанием tgδ конденсатора и снижением его емкости практически до нуля, что обусловлено резким увеличением сопротивления электролита при замерзании.

Для понижения температуры замерзания электролита и расширения нижнего предела рабочей температуры конденсатора в электролит добавляют этиленгликоль $C_2H_4(OH)_2$. При рабочем напряжении 500 V для расширения нижнего предела рабочей температуры до —30° C можно использовать такую рецептуру: 59,7% H_2O; 7,5% H_3BO_3; 0,1% NH_4OH и 32,7% $C_2H_4(OH)_2$ [173].

Наряду с обычными мокрыми конденсаторами находят применение специальные „регулирующие" мокрые конденсаторы [189]. Особенность этих конденсаторов заключается в том, что при определенном значении напряжения, называемого „регулирующим" $U_{рег}$, происходит резкое возрастание тока утечки конденсатора (фиг. 124). Это позволяет применить регулирующие конденсаторы для предупреждения перенапряжения на вторичной обмотке трансформатора выпрямителя, в приемниках с питанием от сети. При формовке анодов регулирующих конденсаторов надо брать $U_ф < U_{рег}$, чтобы получить при значении $U_{рег}$ нужный бросок тока утечки, порядка 50...70 mA. Рабочий электролит подбирают с таким расчетом, чтобы он имел pH ≈7 и $U_0 > U_{рег}$. Успешные результаты были получены с рабочим электролитом, полученным растворением 110 G пентабората аммония: $(NH_4)_2B_{10}O_{16} \cdot 8H_2O$ в 1000 cm^3 воды [190].



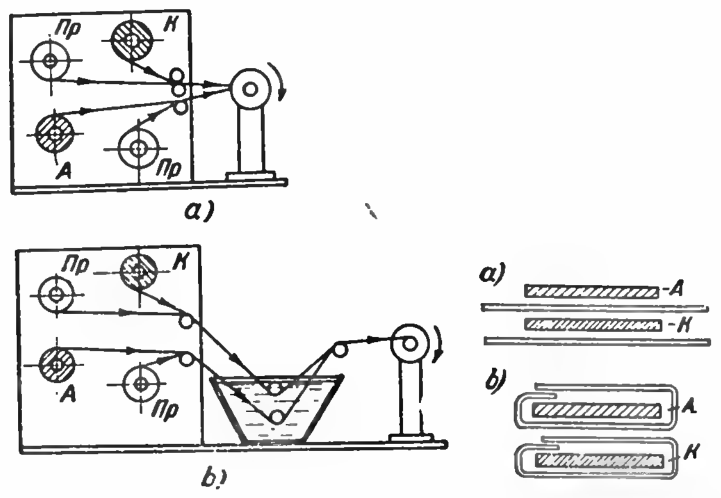
Фиг. 124. Зависимость тока от напряжения для регулирующего электролитического конденсатора (Жиров)

Обычно мокрые конденсаторы, а также и регулирующие конденсаторы необходимо монтировать вертикально, выводом вниз.

§ 58. Сухие конденсаторы

Секции сухих конденсаторов изготовляют намоткой из анодной (оксидированной) фольги, катодной (неоксидированной) фольги и волокнистой разделительной прокладки. Намотку производят ручной скаткой или на намоточных станках, напоминающих станки для намотки бумажных

конденсаторов, но упрощенной конструкции (фиг. 125). Намотку можно производить „сухим" способом, с последующей пропиткой намотанной секции электролитом, или „мокрым" способом; во втором случае на станке установлена ванна, в которой волокнистая прокладка пропитывается электролитом, перед тем как попадает на намоточную оправку. Ванну с электролитом снабжают электроподогревом для поддержания малой вязкости электролита. Секции, на-



Фиг. 125. Схема намоточных станков для сухих электролитических конденсаторов:
а—сухая намотка; *b*—мокрая намотка

Фиг. 126. Намотка сухого электролитического конденсатора:
а—обычная; *б*—с оберткой

мотанные сухим методом, пропитывают рабочим электролитом, применяя один из следующих методов: 1) проварка в рабочем электролите, 2) вакуумная сушка и пропитка электролитом под вакуумом, 3) пропитка электролитом на центрифуге.

В последнем случае электролит вгоняется в секцию за счет воздействия центробежной силы; это обеспечивает высокое качество пропитки.

Некоторые фирмы наряду с обычной намоткой применяют намотку с оберткой (фиг. 126); такая намотка сложнее обычной, но дает уменьшение тока утечки за счет лучшей заформовки краев анода и сокращает габарит конденсатора по длине секции [188].

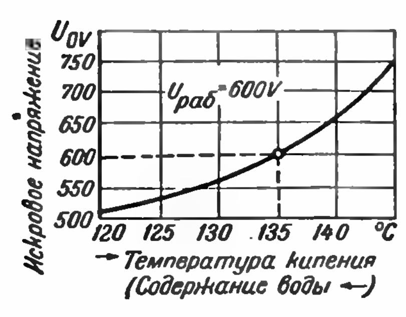
Рабочий электролит сухих конденсаторов в условиях работы должен иметь большую вязкость, препятствующую его вытеканию из волокнистой прокладки.

Поэтому при изготовлении этого электролита в качестве растворителя применяют не воду, а глицерин $C_3H_5(OH)_3$

или этиленгликоль $C_2H_4(OH)_2$. Последний дороже, но обладает более низкой температурой замерзания, а потому позволяет расширить температурный интервал работы сухого конденсатора.

Обычно рабочий электролит составляют из борной кислоты H_3BO_3, водного раствора аммиака NH_4OH и этиленгликоля $C_2H_4(OH)_2$.

При варке электролита H_3BO_3 реагирует с $C_2H_4(OH)_2$, образуя гликоборат и отщепляя воду. Проводимость электролита определяется содержанием в нем воды и количеством NH_4OH.



Фиг. 127. Зависимость искрового напряжения от температуры варки рабочего электролита для сухих конденсаторов (Мэк Найт Дили). Рецептура: 100 G $C_2H_4(OH)_2$; 140 G H_3BO_3; 20 cm³ 28% $NH_4(OH)$

При избытке H_3BO_3 электролит представляет собой при комнатной температуре полутвердую пасту, которая при нагревании ожижается и приобретает способность впитываться в волокнистую прокладку. Длительный нагрев при повышенной температуре вызывает полимеризацию электролита и превращение его в стекловидную массу, негодную для пропитки. Умеренный прогрев электролита полезен, так как уменьшает содержание в нем воды и увеличивает его искровое напряжение U_0 (фиг. 127). Об уменьшении содержания воды в электролите после прогрева можно судить по повышению точки кипения электролита.

Отечественные рецептуры рабочих электролитов приведены в табл. 15.

В качестве волокнистой прокладки — носителя рабочего электролита — применяют специальную марлю (в два слоя по 0,12...0,20 mm) или пористую бумагу типа фильтровальной (в один слой, 0,10 mm). Бумажная прокладка дешевле марлевой и позволяет снизить габарит конденсатора, но при такой прокладке уменьшено количество впитанного электролита. Это затрудняет вторичную формовку и сокращает срок службы конденсатора. Некоторые фирмы применяют комбинацию из одного слоя бумаги толщиной 0,05...0,075 mm и слоя марли толщиной 0,15...0,25 mm [188; 191]. Иностранные фирмы работают над освоением новых типов прокладки с увеличенным содержанием электролита. Один вариант: применение пленки гидратированной клетчатки — целлофана, в которую вводят электролит в процессе ее изготовления. Второй вариант: применение лент, полученных прокаткой

электролита, приведенного путем перегрева в сильно полимеризованное состояние. Для увеличения проводимости такой прокладки в нее вводят проводящие примеси [173].

Таблица 15

Рецептуры рабочего электролита для сухих конденсаторов [181]

Тип конденсатора	$C_3H_5(OH)_3$, cm^3	$C_2H_4(OH)_2$, cm^3	H_3BO_3, G	NH_4OH, G	Температура варки, °C
Для всех типов	—	1000	1800	70	116...120
Стартерные 110...220 V 50 Hz . .	—	1000	1000	60	132...134
Высоковольтные . . .	1000	—	1200	—*	118...120
Высоковольтные	—	1000	1100	—*	125
Низковольтные	1000	—	800	—*	128

После скатки или намотки секция сухого конденсатора имеет резко увеличенный ток утечки. Это объясняется главным образом тем, что для получения анодного вывода у края анода делают надрез, после чего надрезаемая полоска отгибается и выводится с торца за край секции. При этом в местах надреза нарушается целость оксидного слоя. Для заформовки поврежденных краев анода и снижения тока утечки до нормальных пределов производится вторичная формовка („тренировка") намотанных секций. Этот процесс сводится к тому, что секции включаются на некоторое время под рабочее напряжение, через последовательно включенное сопротивление, ограничивающее силу тока в начале процесса. Иногда вторичную формовку производят не для секций, а для окончательно собранных в корпусах конденсаторов. Сухие конденсаторы собирают в металлических (обычно алюминиевых, реже жестяных) или в картонных корпусах. Последние пропитывают воском. Металлический корпус иногда применяется того же типа, как в случае мокрых конденсаторов (фиг. 122), но чаще имеет вид стаканчика, закрытого сверху изоляционной крышкой (эбонит, гетинакс) с выводным контактом или выводным проводником (вывод плюс; корпус минус); сухие конденсаторы относительно небольшой емкости (1...8 μF при ра-

* Пропускается газообразный NH_3 до получения значения pH=5,4...55, у готового электролита.

бочем напряжении 200...450 V; 10...25 μF при 25...50 V) изготовляют также в картонных или металлических трубках для висячего монтажа.

Удельный объем высоковольтных сухих конденсаторов с гладким анодом в 10...15 раз меньше, чем у обычных бумажных конденсаторов. Низковольтные сухие конденсаторы имеют весьма малые значения удельных объемов при больших номинальных емкостях: конденсатор 2000 μF 12 V с гладким анодом имеет удельный объем менее 0,2 $cm^3/\mu F$. Травление фольги, а тем более переход на алюминизированную ткань дает еще меньшие значения удельного объема.

Сухие электролитические конденсаторы часто изготовляют в виде блоков, представляющих собой набор из нескольких секций одинаковой или различной емкости, иногда с различным рабочим напряжением, помещенных в общий корпус.

Обычно для уменьшения габарита блок изготовляют с общим катодом, общей прокладкой и несколькими анодами, в соответствии с номинальными емкостями секций блока. Рецептуру электролита берут в соответствии с наибольшим рабочим напряжением секций данного блока. При резком различии рабочего напряжения у разных секций удобнее выделить высоковольтные секции в отдельную систему, с отдельным общим катодом и отдельной прокладкой. Эту систему отделяют от системы низковольтных секций барьером из лакоткани или лакобумаги. Замена отдельных конденсаторов блоком дает большой выигрыш в объеме, но ухудшает условия теплоотдачи; поэтому допустимые нагрузки для секций блока меньше, чем для отдельных конденсаторов.

Сухие конденсаторы можно монтировать в любом положении.

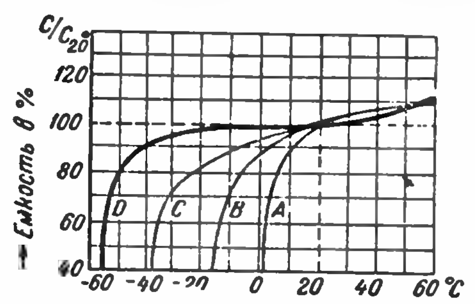
§ 59. Электрические свойства электролитических конденсаторов

Емкость электролитического конденсатора трудно получить очень близкой к заданному номиналу, особенно в случае применения травленых анодов. Обычный допуск по емкости составляет: от $-20...50\%$ до $+50...75\%$. Резкие изменения емкости вызываются изменениями температуры и частоты. Влияние обоих этих факторов на емкость конденсатора в значительной степени обусловлено большим, последовательно включенным сопротивлением электролита в данном типе конденсатора.

Угол потерь конденсатора также в значительной степени обусловлен этим сопротивлением; поэтому о степени зависимости емкости электролитического конденсатора от

температуры и частоты обычно можно судить по величине tgδ; чем выше tgδ, тем более резкими будут изменения емкости.

Резкое уменьшение емкости электролитических конденсаторов происходит при отрицательных температурах (фиг. 128). Мокрые конденсаторы резко снижают емкость уже при 0°С; сухие глицериновые конденсаторы дают резкое снижение емкости при —15 ... 25° С; наивысшей морозостойкостью обладают этиленгликолевые конденсаторы. Степень снижения емкости с температурой зависит не только от типа растворителя в рабочем электролите, но и от ряда других факторов, в частности от режима варки электролита, определяющего остаточное содержание воды в электролите и удельное сопротивление последнего.



Фиг. 128. Зависимость емкости электролитических конденсаторов от температуры:
A — мокрый конденсатор; *B* — сухой глицериновый конденсатор; *C* и *D* — сухие этиленгликолевые конденсаторы

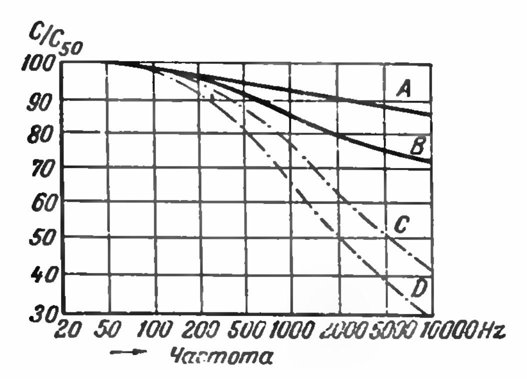
Этим объясняется различие в ходе кривых *C* и *D* (фиг. 128), хотя обе кривые получены при одном и том же растворителе: этиленгликоле. Улучшение характера зависимости $C=f(t)$ при низких температурах путем увеличения содержания остаточной воды в электролите сопровождается ухудшением зависимости $i_{ут}=f(t)$ в области повышенных температур; таким образом расширение нижнего предела рабочей температуры (определяемого резким снижением емкости) сопровождается снижением верхнего предела рабочей температуры (определяемого ростом тока утечки). Для американских сухих этиленгликолевых конденсаторов обычный рабочий интервал температур: от —30 до +60° С; снижение нижнего предела до —60° С делает работу конденсатора при +60° С неустойчивой; конденсаторы с верхним пределом температуры +80° С при температуре —20° С уже снижают емкость на 50% [192]. Морозостойкость сухих конденсаторов может быть улучшена добавлением к электролиту некоторого количества одноатомного спирта, например C_2H_5OH [193].

Улучшение морозостойкости может быть также достигнуто при замене бумажной прокладки марлей или тканью типа перкаль.

Кривые $C=f(t)$ на фиг. 128 получены для высоковольтных конденсаторов при технической частоте; повышение

частоты дает более резкое снижение емкости при низких температурах. Низковольтные конденсаторы, изготовляемые с применением электролита с меньшим удельным сопротивлением, дают более благоприятный ход кривой $C=f(t)$ при низких температурах, чем высоковольтные.

Повышение частоты вызывает снижение емкости электролитических конденсаторов (фиг. 129). Мокрые конден-



Фиг. 129. Зависимость емкости электролитических конденсаторов от частоты (Курсей и Рэй): *AB*—сухие конденсаторы 8 μF, 500...525 V; *CD*—мокрые конденсаторы 8 μF, 460...475 V

саторы сильнее уменьшают емкость с частотой, чем сухие, в соответствии с их большим последовательным сопротивлением (расстояние между анодом и стенкой корпуса — катода в мокром конденсаторе больше толщины прокладки, разделяющей анод и катод в сухом конденсаторе).

Колебания температуры и частоты вызывают только обратимые изменения емкости. Вместе с тем с течением времени наблюдается постепенное необратимое изменение емкости электролитических конденсаторов (фиг. 130), обусловленное процессом их старения, приводящим в конце концов к негодности конденсатора.

Сопротивление изоляции электролитических конденсаторов принято характеризовать значением тока утечки, рассчитанным на единицу емкости: $i_{ут}$ в μA/μF.

Ток утечки электролитических конденсаторов резко повышен по сравнению с обычными типами конденсаторов с твердым диэлектриком, что обусловлено особенностями оксидного слоя.

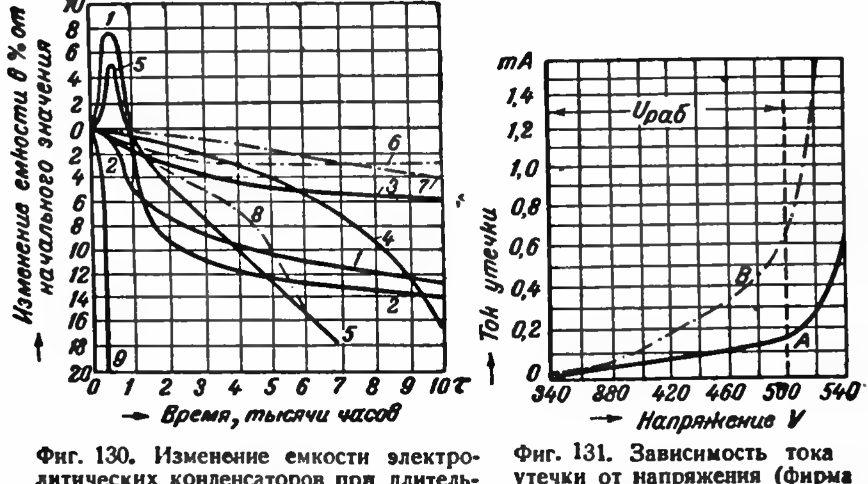
Для подсчета максимального допускаемого значения тока утечки электролитических конденсаторов, измеренного при рабочем напряжении $U_{раб}$ через 5 минут после вклю-

чения напряжения на конденсатор, применяют формулу:

$$i_{ут} = kU_{раб}, \qquad (70)$$

где $i_{ут}$ — в $\frac{\mu A}{\mu F}$; $U_{раб}$ — в V; коэфициент k принимают равным для мокрых конденсаторов $0{,}3\ \frac{\mu A}{V \cdot \mu F}$ и для сухих $0{,}2\ \frac{\mu A}{V \cdot \mu F}$.

Фактическое значение тока утечки доброкачественных конденсаторов при комнатной температуре в 3...5 раз ниже, чем подсчитанное по формуле (70).



Фиг. 130. Изменение емкости электролитических конденсаторов при длительной работе:

Сухие конденсаторы: *1*, *2* — Курсей и Рэй; *3* — Шноль; *4* — Солар; *5* — при + 40°C Мак Найт Дили. Мокрые конденсаторы: *6* — Курсей и Рэй; *7* — Мак Найт Дили; *8* — Солар. Сухой конденсатор при + 85°C: *9* — Николаева и Цикин

Фиг. 131. Зависимость тока утечки от напряжения (фирма Солар):

A—сухой конденсатор — 8 μF, 500 V; *B*—мокрый конденсатор — 8 μF, 500 V

Увеличение напряжения увеличивает ток утечки, причем после перехода через значение $U_{раб}$ возрастание тока утечки становится весьма резким (фиг. 131); поэтому при включении конденсатора под напряжение больше $U_{раб}$ он быстро погибает из-за перегрева нарастающим током утечки. Величина допустимого кратковременного перенапряжения для электролитического конденсатора характеризуется пиковым напряжением $U_{пик}$. Для высоковольтных конденсаторов $U_{пик} = U_{раб} + (25...50)$ V; для низковольтных конденсаторов $U_{пик} = U_{раб} + (3...10)$ V.

Повышение температуры вызывает возрастание тока утечки (фиг. 132), что лимитирует верхний предел рабочей температуры электролитического конденсатора (обычно $+60^\circ$ C; для специальных типов $+80^\circ$ C).

В момент включения конденсатора под напряжение происходит резкий бросок силы тока, особенно заметный у мокрых конденсаторов; затем ток утечки быстро спадает. При длительном бездействии конденсатора происходит „расформовка", т. е. возрастание начального тока утечки.

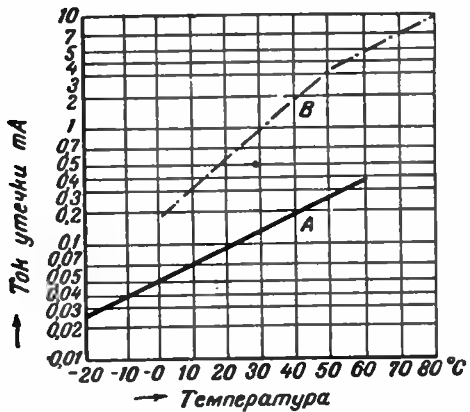
Через некоторое время после включения „расформованного" конденсатора под рабочее напряжение обычно достигаются начальные значения тока утечки (фиг. 133).

Угол потерь электролитических конденсаторов резко повышен по сравнению с другими типами конденсаторов; изготовлявшиеся ранее электролитические конденсаторы часто имели угол потерь выше 45° ($tg\delta > 1,0$). Современные конденсаторы имеют уменьшенный угол потерь, приближающийся, в пределе, к плохим образцам бумажных конденсаторов $tg\delta = 0,01...0,02$. Обычно потери в электролитическом конденсаторе характеризуют величиной коэфициента мощности: $cos\varphi$ [для пересчета к величине $tg\delta$ служит формула (42), § 15]. Средние значения коэфициента мощности для сухих высоковольтных конденсаторов $\cos\varphi = 0,10...0,15$; для сухих низковольтных конденсаторов $\cos\varphi = 0,20...0,25$; для мокрых конденсаторов $\cos\varphi = 0,20...0,30$.

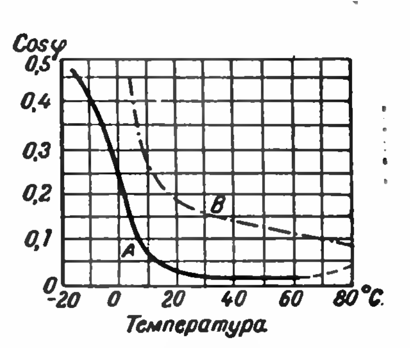
Понижение температуры увеличивает сопротивление электролита и вызывает рост угла потерь конденсаторов; при повышении температуры выше определенного предела угол потерь также может несколько возрасти, на этот раз за счет увеличения тока утечки (фиг. 134). Поскольку потери при обычной температуре определяются в основном последовательным сопротивлением электролита, повышение частоты дает возрастание угла потерь в качественном соответствии с формулой (37). В широком интервале частот зависимость угла потерь от частоты имеет сложный характер (фиг. 135), который можно объяснить исходя из усложненной эквивалентной схемы электролитического конденсатора (§ 54).

Обычные полярные электролитические конденсаторы применяют чаще всего при выпрямленном рабочем напряжении; в этом случае величина $\cos\varphi$ определяет в значительной степени допустимое значение переменной составляющей выпрямленного напряжения, которое можно безопасно прикладывать к конденсатору, не вызывая чрезмерного перегрева. Для высоковольтных конденсаторов с гладкой фольгой допускают величину переменной составляющей, равную 10% от $U_{раб}$ при том условии, чтобы $U_{раб} + U_{\sim max} \leqslant U_{пик}$,

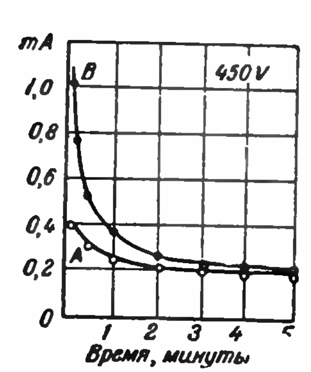
где $U_{\sim max}$ — амплитуда переменной составляющей. При уменьшении удельного объема конденсатора за счет при-



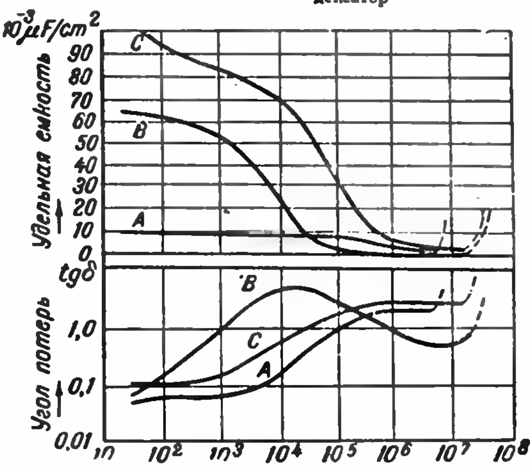
Фиг. 132. Зависимость тока утечки конденсаторов 8 μF, 500 V от температуры (фирма Солар):
A—сухой конденсатор; *B*—мокрый конденсатор



Фиг. 134. Зависимость угла потерь (коэфициента мощности) электролитических конденсаторов 8 μF, 500 V от температуры (фирма Солар):
A—сухой конденсатор; *B*—мокрый конденсатор



Фиг. 133. Зависимость тока утечки сухого конденсатора 10 μF, 450 V от времени (Ренне):
A—свежеизготовленный конденсатор; *B*—тот же конденсатор после бездействия в течение 150 часов



Фиг. 135. Зависимость удельной емкости и угла потерь электролитических конденсаторов от частоты (Вахсихузен):
A—гладкий анод; формовочное напряжение 500 V; *B*—травленый анод; формовочное напряжение 500 V; *C*—гладкий анод; формовочное напряжение 50 V

менения травленой фольги условия отвода тепла ухудшаются вследствие сокращения поверхности охлаждения;

поэтому для этих конденсаторов при том же значении $\cos\varphi$ допустимое значение переменной составляющей $U_{эфф}$ снижают обычно до 5% $U_{раб}$. Дальнейшее снижение удельного объема при использовании алюминизированной ткани требует дальнейшего снижения переменной составляющей.

Для определения размеров конденсатора, обеспечивающих отсутствие недопустимого перегрева при заданной нагрузке или для установления допустимой нагрузки для конденсатора с заданными размерами, Л. Н. Закгеймом предложен метод теплового расчета [194].

В мокрых конденсаторах за счет конвекции электролита условия отвода тепла лучше, чем в сухих; поэтому для мокрых конденсаторов можно допускать большее значение $U_{эфф}$. В данном случае, при алюминиевых корпусах, величину $U_{эфф}$ надо ограничивать во избежание сильного снижения емкости за счет заформовки катода (стенок корпуса). Если возможность заформовки устранена (хромированием алюминиевого корпуса или применением медных корпусов), то допускаемая переменная составляющая ограничивается только допустимым нагревом.

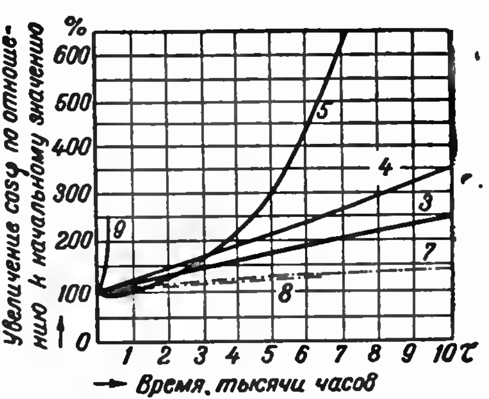
Преимуществом мокрых конденсаторов перед сухими, кроме большой допустимой величины переменной составляющей и большого толчка тока при включении, полезного для сглаживания перенапряжения, является их способность восстанавливаться после пробоя при случайном перенапряжении, когда напряжение снова снизится до величины $U_{раб}$. Восстановление объясняется быстрой заформовкой пробитого места. В случае сухих конденсаторов, в большинстве случаев, при резком повышении напряжения происходит окончательный пробой и устанавливается прочное соединение анода с катодом. Это объясняется интенсивным газообразованием в момент пробоя, приводящим к прорыву волокнистой прокладки и установлению непосредственного контакта между анодом и катодом. Увеличение толщины и прочности прокладки поэтому может дать повышение пробивного напряжения сухого конденсатора.

Вместе с тем сухие конденсаторы по конструкции проще мокрых, имеют улучшенные значения тока утечки и $\cos\varphi$ и удобнее в монтаже.

Поэтому сухие конденсаторы в современной технике применяют значительно шире, чем мокрые.

Для электролитических конденсаторов как мокрого, так и сухого типа наблюдается постепенное систематическое ухудшение электрических характеристик с течением времени; это явление называют процессом старения электролитических конденсаторов; оно определяет собой ограниченность срока службы конденсатора.

Первые образцы электролитических конденсаторов как иностранного изготовления, так и отечественные при освоении производства этих конденсаторов в СССР [184] имели весьма ограниченный срок службы, особенно при повышенной рабочей температуре, иногда не превышавший нескольких десятков часов. Основной причиной гибели конденсаторов в этот ранний период их изготовления являлось резкое возрастание тока утечки, обусловленное коррозией анодов. Резкое улучшение чистоты всех исходных материалов и повышение культуры производства позволило устранить коррозию и значительно увеличить срок службы конденсатора. Теперь срок службы ограничивается снижением емкости и возрастанием угла потерь конденсатора с течением времени (фиг. 130 и 136).



Фиг. 136. Изменение угла потерь (коэфициента мощности) в процессе старения электролитических конденсаторов (обозначения кривых см. на фиг. 130)

Снижение емкости и возрастание угла потерь сухих конденсаторов с течением времени объясняется постепенным высыханием рабочего электролита, т. е. потерей воды, содержащейся в нем наравне с неводными растворителями.

Потеря воды обусловлена ее испарением и расходом на восстановление оксидной пленки. Потеря воды увеличивает ρ электролита, что и служит причиной увеличения $\cos\varphi$ и снижения емкости.

Особенно интенсивно этот процесс идет при повышенной температуре для конденсаторов в картонных корпусах. Поэтому герметизация повышает срок службы конденсатора. Она полезна и для защиты от поглощения влаги извне, которое может приводить к искрообразованию у краев. Последнее может быть обусловлено местным снижением ρ электролита при поглощении влаги в торцевой части конденсатора, что может привести к снижению U_0 в данном участке до величины ниже $U_{раб}$.

Иногда в начале процесса старения сухих конденсаторов наблюдается увеличение емкости (фиг. 130). Его можно объяснить постепенным исчезновением воздушных мешков между анодом и прокладкой, появившихся вследствие недостаточной тщательности пропитки конденсатора электролитом.

В мокрых конденсаторах снижение емкости и возрастание потерь происходит за счет отложения на поверхности анода коллоидных алюминиевых солей, создающих добавочное последовательно включенное сопротивление. Этот процесс идет далеко не так интенсивно, как старение сухих конденсаторов. Резкое снижение емкости мокрых конденсаторов имеет место тогда, когда за счет испарения уровень электролита снизится настолько, что будет обнажена часть анодной поверхности.

Ток утечки при длительной работе вполне доброкачественного конденсатора сначала медленно снижается на протяжении нескольких месяцев, а затем сохраняет установившееся значение.

Для современных электролитических конденсаторов при непрерывной работе срок службы составляет не менее 5 000...10 000 часов.

В конце этого срока конденсатор еще может работать, хотя его $\cos\varphi$ заметно повышен, а емкость снижена по сравнению с исходными значениями.

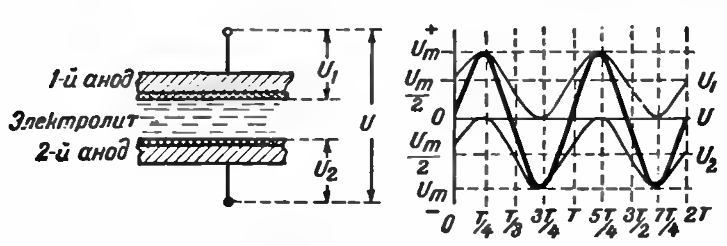
§ 60. Электролитические конденсаторы переменного тока

Благодаря униполярной проводимости оксидного слоя обычный электролитический конденсатор обладает полярностью.

Заменив катод в сухом конденсаторе вторым анодом, т. е. оксидированной фольгой, получаем „неполярный" электролитический конденсатор, который можно безопасно включить в цепь постоянного тока, не соблюдая полярности. Неполярный конденсатор представляет собой систему из двух анодов, разделенную электролитом. Емкость двух оксидных слоев в таком конденсаторе соединена последовательно, а поэтому удельная емкость снижена. При равной емкости объем неполярного конденсатора в два раза больше, чем у обычного полярного, тогда как при осуществлении неполярности простым встречным включением двух полярных конденсаторов при той же емкости объем был бы в 4 раза больше. При изготовлении неполярных конденсаторов каждый анод рассчитывают на полное рабочее напряжение, так как при любом включении один из анодов находится при полном напряжении, поскольку сопротивление второго анода в это время резко снижено. Собранный конденсатор должен проходить вторичную формовку дважды, в двух противоположных направлениях, чтобы обеспечить заформовку обоих анодов [199—200].

В остальном изготовление неполярных конденсаторов подобно изготовлению обычных полярных сухих конденсаторов.

Если включить неполярный конденсатор в цепь чистого переменного тока напряжением u, то величины напряжений на каждом из анодов u_1 и u_2 и значения энергии, запасаемой в каждом из оксидных слоев W_1 и W_2, в различные моменты времени за один период изменения тока бу-



Фиг. 137. Схема неполярного конденсатора и изменение напряжения на его анодах при включении в цепь переменного тока

дут иметь значения, приведенные в табл. 16. Графическое изображение изменения напряжений u, u_1 и u_2 во времени приведено на фиг. 137 [199].

Таблица 16

Распределение напряжения и энергии между анодами неполярного конденсатора, включенного в цепь переменного тока

Время в долях периода	Напряжение			Энергия		
	u	u_1	u_2	W_1	W_2	W_1+W_2
0	0	$+U_м/2$	$-U_м/2$	$\frac{CU_м^2}{8}$	$\frac{CU_м^2}{8}$	$\frac{CU_м^2}{4}$
T/4	$+U_м$	$+U_м$	0	$\frac{CU_м^2}{2}$	0	$\frac{CU_м^2}{2}$
T/2	0	$+U_м/2$	$-U_м/2$	$\frac{CU_м^2}{8}$	$\frac{CU_м^2}{8}$	$\frac{CU_м^2}{4}$
3T/4	$-U_м$	0	$-U_м$	0	$\frac{CU_м^2}{2}$	$\frac{CU_м^2}{2}$
T	0	$+U_м/2$	$-U_м/2$	$\frac{CU_м^2}{8}$	$\frac{CU_м^2}{8}$	$\frac{CU_м^2}{4}$

Большая величина угла потерь электролитических конденсаторов не позволяет длительно использовать неполярный конденсатор в цепи переменного тока, при сколько-нибудь значительном напряжении. Поэтому иностранная промышленность освоила в массовом масштабе электролитический конденсатор переменного тока, рассчитанный лишь

на кратковременное включение в цепь переменного тока, с последующим периодом отдыха, достаточным для снижения температуры конденсатора до нормального значения. Такие конденсаторы нашли себе применение для пуска однофазных электродвигателей, требующих для создания достаточного пускового момента кратковременного включения большой емкости во вспомогательную фазу. После того как электродвигатель набирает нужное число оборотов в минуту, эта емкость автоматически отключается центробежиым выключателем. Такие электролитические конденсаторы переменного тока называют поэтому „пусковыми" или „стартерными". Американские фирмы изготовляют конденсаторы этого типа емкостью от 20 до 150 μF на рабочее напряжение 110 и 220 $V_{эфф}$ при частоте 60 Hz [197—198].

Удельный объем конденсаторов при максимальной номинальной емкости составляет: при рабочем напряжении 110 V 3,5...4 cm³/μF, при 220 V 7,5...9cm³/μF. Успешные опыты по изготовлению стартерных электролитических конденсаторов переменного тока проведены в СССР [200].

При изготовлении этих конденсаторов первичная формовка анодов ведется так же, как и для обычных сухих конденсаторов, причем формовочное напряжение должно быть не ниже амплитудного значения рабочего напряжения: $U_ф > \sqrt{2}\ U_{раб\ эфф}$.

В общей сумме потерь решающую роль играют потери в электролите. Поэтому надо максимально снижать удельное сопротивление электролита, уменьшая его вязкость. Снижение вязкости нужно также для облегчения пропитки секций, которые имеют больший объем, чем секции обычных конденсаторов. Большое значение имеет также правильный выбор волокнистой прокладки. Американцы применяют для этой цели специальную бумагу с повышенной абсорбционной способностью толщиной 0,10...0,15 mm.

Современные стартерные электролитические конденсаторы имеют при технической частоте $\operatorname{tg}\delta = 0{,}03...0{,}05$; фирма Солар гарантирует для своих конденсаторов $\cos\varphi < 7\%$. Зависимость угла потерь и емкости этих конденсаторов от температуры имеет характер, обычный для сухих этиленгликолевых конденсаторов. Температурный коэфициент емкости для пределов от -40 до $+60°$ С составляет $\alpha_t = 0{,}23\%$ на 1° С [197].

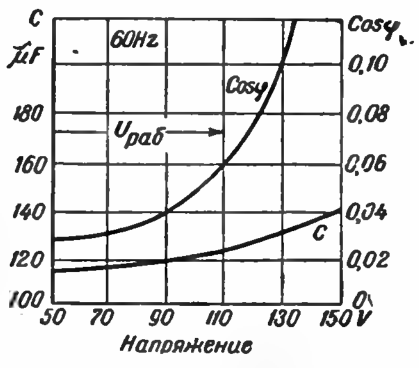
Зависимость емкости и $\cos\varphi$ от напряжения приведена на фиг. 138.

Зависимость потерь в конденсаторе P_A от напряжения U может быть выражена формулой [197]:

$$P_A = kU^{2,5}, \tag{71}$$

где коэфициент k зависит от емкости, cos φ и температуры конденсатора.

Фирма Солар указывает, что стартерные конденсаторы рассчитаны на 20 включений в час, с продолжительностью каждого включения не более 3 секунд при частоте 50...60 Hz и температуре 55° С. При длительном включении в цепь переменного тока эти конденсаторы перегреваются и быстро выходят из строя.



Фиг. 138. Зависимость емкости и угла потерь (коэфициент мощности стартерного конденсатора 20 μF 110 V от напряжения (Мак Найт Дили)

Принципиально возможно изготовить электролитические конденсаторы, рассчитанные и на длительную работу в цепи переменного тока.

Исследовательская работа в этом направлении давно ведется иностранными фирмами. В СССР в лабораторных условиях уже были получены удачные образцы таких конденсаторов [201]. Можно ожидать, что в будущем электролитические конденсаторы переменного тока будут пущены в производство.

Приложение

ГОСТ 2519-44. КОНДЕНСАТОРЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ

НОРМАЛЬНАЯ ШКАЛА ЕМКОСТЕЙ. срок введения I/XI-44 г.

В зависимости от класса точности номинальная емкость конденсаторов должна соответствовать одному из значений табл. 1 и 2.

Таблица 1

Номинальные значения емкости электрических конденсаторов от 10 до 9100 μμF

Классы точности								
± 5%			± 10%			± 20%		
10	100	1000	10	100	1000	10	100	1000
11	110	1100	—	—	—	—	—	—
12	120	1200	12	120	1200	—	—	—
13	130	1300	—	—	—	—	—	—
15	150	1500	15	150	1500	15	150	1500
16	160	1600	—	—	—	—	—	—
18	180	1800	18	180	1800	—	—	—
20	200	2000	—	—	—	—	—	—
22	220	2200	22	220	2200	22	220	2200
24	240	2400	—	—	—	—	—	—
27	270	2700	27	270	2700	—	—	—
30	300	3000	—	—	—	—	—	—
33	330	3300	33	330	3300	33	330	3300
36	360	3600	—	—	—	—	—	—
39	390	3900	39	390	3900	—	—	—
43	430	4300	—	—	—	—	—	—
47	470	4700	47	470	4700	47	470	4700
51	510	5100	—	—	—	—	—	—
56	560	5600	56	560	5600	—	—	—
62	620	6200	—	—	—	—	—	—
68	680	6800	68	680	6800	68	680	6800
75	750	7500	—	—	—	—	—	—
82	820	8200	82	820	8200	—	—	—
91	910	9100	—	—	—	—	—	—

Таблица 2

Номинальные значения емкости электрических конденсаторов от 0,01 до 2000 μF для классов точности ±5; ±10; ±20% и более

0,01	1	100	0,1	10	1000
0,012*	1,2*	120*	0,12 *	12 *	1200*
0,015	1,5	150	0,15	15	1500
0,018*	1,8*	180*	0,18 *	18 *	1800*
0,02	2	200	0,20	20	2000
0,025*	2,5*	250*	0,25 *	25 *	—
0,03	3	300	0,3	30	—
0,04 *	4 *	400*	0,4 *	40 *	—
0,05	5	500	0,5	50	—
0,06 *	6 *	600*	0,6 *	60 *	—
0,07	7	700	0,7	70	—
0,08 *	8 *	800*	0,8 *	80 *	—

Примечание. Для конденсаторов с малым классом точности (±20% и больше) номинальные значения емкости, отмеченные знаком *, по возможности не применять.

ЛИТЕРАТУРА

А. Общие свойства и испытания конденсаторов

1. P. Coursey, „Electrical Condensers", London, 1927
2. G. Straimer, „Der Kondensator in der Fernmeldetechnik", Leipzig, 1939
3. F. Bauer, „Der Kondensator in der Starkstromtechnik", Berlin, 1934
4. В. Т. Ренне, „Конденсаторы постоянной емкости", Справочник-каталог, КГСК, 1936.
5. М. М. Михайлов, „Электроматериаловедение", ГЭИ, 1940
6. К. А. Круг, „Основы электротехники"
7. А. К. Годзевский, „Радиодетали", Ам. Техн. и Пром., 1943, № 1, стр. 2—10
8. В. Т. Ренне, „Конденсаторы для боеприпасов", Оборонгиз, 1944

8а. Б. М. Вул, Вещества со сверхвысокой диэлектрической постоянной, Эл-во, 1946, № 3, стр. 12

9. В. Т. Ренне, „К вопросу об испытании бумажных конденсаторов на пробой", Вестн. Эл. Пром., 1937, № 6, стр. 42
10. R. Maddison, „Absorption in electric condensers" Frankl. Inst. J., 1932, vol. 214, № 3, p. 327
11. L. Linder, J. Schniedermann, „Einfluss der Eigeninduktivität von Wickelkondensatoren auf ihrem Scheinwiderstand", E. T. Z., 1939, Bd. 60, № 29, S. 793
12. Л. А. Фоменко. „Индуктивность конденсаторов", ИЭСТ, 1940, № 9, стр. 47—53
13. L. Linder, J. Schniedermann, „Das Verhalten von Papierwickel-Kondensatoren bei hoheren Frequenzen", Z. für Fernmeldetechn., 1937, № 5, S. 73
14. D. Sinclair, „The behaviour of type 505 condensers at high frequencies" Gen. Radio. Experimenter, 1938, vol. XII, № 11, p. 4—8
15. П. Городецкий, „Компенсация сдвига фаз при несинусоидальном напряжении", Эл-во, 1937, № 22, стр. 27
16. T. Walcher, „Die Methoden der Kapazitätsmessung", El. und Masch. Bau, 1934, Bd. 52, № 31, S. 360.
17. W. Schwerdtfeger, „Kapazitätsmessung Methoden und ihre Anwendung zum Bau von Betriebskapazitätsmessgeräten" Feinmech, uud Präz., 1938, Bd. 46, S 61.
18. W. Geiger, „Ueber die Verwendung des C-tg δ Schreiber", Arch, für El. 1937, Bd. 31 № 2, S. 115.
19. Electronics, 1941, august, p. 59; Erie Resistor Corp; A. T. M., 1941. № 116
20. В. Т. Ренне и Л. А. Мозокин, „Установка для автоматической записи изменения сопротивления изоляции", Инф. Бюлл НКС, 1940, № 9, стр. 34.
21. Karoluss, Reuss, Phys. Zeitschrift, 1921. S. 362
22. V. Kulebakin; E. T. Z., 1925, № 25, S. 362

22а. К. Б. Карандеев, „Измеритель емкости с непосредственным отсчетом", Электричество, 1932, № 6

23. B. Hague, „Alternating current Bridge Methods", London, 1930
24. А. И. Нестеренко, „Аппарат для измерения емкости и диэлектрических потерь", Вестн. Эл. пр., 1940, № 8, стр. 58
25. D. Bercovitz, „Das Weston Mikrofaradmeter", E. T. Z., 1925, Februar 26, S. 312

26. „Hartmann und Braun Kapazitätsmesser", A. T. M., 1932, April, V. 3532—3
27. В. О. Арутюнов, „Новый электромагнитный логометр и его применение в качестве микрофарадометра", ИЭСТ, 1937, № 2, стр. 40
28. М. М. Михайлов, В. Т. Ренне и др., „Испытания электроизолирующих материалов", ОНТИ, 1936
29. В. Т. Ренне, „Руководство по лабораторным занятиям в лаборатории электроизолирующих материалов", Изд. ЛИИ, 1938
30. S. Leonard, „Measuring of minute changes of capacitance", Electronics, 1938, vol. 11, № 3, p. 18
31. L. Rohde, „Geräte zur Messung der Temperaturabhängigkeit von Hochfrequenz-Kondensatoren", A. T. M., 1938, № 82, Z 136, S. 49—50
32. E. Horst, „Über Zeitkonstanten von Kondensatoren", Arch. f. El., 1937, Bd. XXXI, № 4, S. 273
33. F. Schäfer, „Über das dielektrische Verhalten von Niederspannungs-Kondensatoren", Arch. f. El., 1930, Bd. XXIII, № 3, S. 351
34. L. Tauzin, „L'amelioration du facteur de puissance par les condensateurs statiques", Rev. d'el. et de mech., 1929, № 7, p. VII—8
35. L. Linder, „Prüfung und Betriebssicherheit von Kondensatoren", Veröff. aus dem Geb. der Nachricht.-Techn., 1936, 6, 2 Folge
36. В. Т. Ренне, „К вопросу о предугадывании электрической прочности пропитанной бумаги", ЖТФ, 1943, т. XIII, № 4—5, стр. 259

Б. Конденсаторы с газообразным диэлектриком

37. E. Giebe. G, Zickner, „Normal-Luftkondensatoren", Zeitschr. für Instrumentenkunde, 1933, Bd. № 1, S. 1
38. Л. И. Сапельков, „Прецизионные конденсаторы", Вестн. Эл. Пр., 1931, № 8, стр. 361
39. A. Semm, Arch. f. El, 1921, Bd. 9, S. 30
40. J. Whitehead, T, Isshiki, Tr. Am. I. E. E., 1920, vol. 39, p. 1057
41. B. Churcher, C. Dannat, „The use of air condensers as high voltage Standards", J. I. E. E., 1931, Vol. 69, p. 1019
42. С. Гоноровский, „Расчет L-C-R передатчиков", 1930
43. W. Griffiths, „Notes on the laws of variable air Condensers", Exp. Wireless and Wireless Eng., 1926, vol. III, № 28, p. 3
44. L. Rohde, W. Süss, „Aufbau eines Präzisionskondensators", Feinmech. und Präz., 1936, № 8, S. 129
44a. E. Moullin „A variable capacity cylindrical condenser for precision measurments", The Wireless Eng., 1931, vol. VIII, № 89, p. 84.
45. М. А. Жилинский, „Технологические процессы в производстве радиоаппаратуры", ОНТИ, 1935
46. W. Griffiths, „Wide range variable condenser for special laws". The Wireless Eng. Exp. Wireless, 1934, vol. XI, № 131, p. 45
47. The General Radio Experimenter, 1935, vol. IX, № 3; vol. IX, № 5, 1936 vol. X, № 8; 1937, vol. XI, № 9; vol. XIII, № 5—6; 1939, vol. XIV, № 3
48. W. Griffiths, „The losses in variable air condensers", Exp. Wireless & Wireless Eng., 1931, vol. 9, p. 124
49. W. Golke, El. Nachrichten Technik (E. N. T.) 1937, № 8, S. 260
50. H. Thomas, „The electrical stability of condensers", J. I. E. E., 1936, vol. 79, № 477, p. 297
51. H. Thomas, „A variable air condenser with ajustable compensation for temperature", J. I. E. E, 1937, vol. 81, № 488, p. 277
52. H. Thomas. „The development of a small air condenser compensated for rapid changes of temperature", J. I. E. E., 1939, vol. 84, № 508, p. 495
53. П. А. Лосицкий и А. П. Трифонов, „Полупеременный конденсатор с воздушным диэлектриком", Вестн. Эл. Пр., 1944, № 1—2, стр. 17
54. H. Schering und R. Vieweg, „Ein Messkondensator für Höchstspannungen", Z. f. Techn. Phys., 1928, Bd. 9, S. 442
55. „Pressure capacitors", Electronics, 1939, vol. 12, № 4, p. 16
56. М. А. Жилинский, И. Э. С. Т., 1937, № 5—6, стр. 9

56а. Б. М. Гохберг, Н. М. Рейнов, Журн. Техн. Физ., 1945, том XV вып. 10, стр. 713
57. „Vacuum — tank condensers," Communications, 1938, vol. 18, № 8, p. 23.
57а. G. H. Floyd, „Vacuum capacitors", Proceed. IRE, 1944, vol. 32, № 8, p. 463; H. Michaelson, Electronics, 1944, September, p. 124.
57б. „New Electrical Developments of 1944", General Electric Review, 1945, vol. 48, № 1, p. 29; F. M. Clark, M. E. Scoville, El. Eng., 1945, №11, p. 691; реф. Эл-во, 1946, № 8, стр. 94

В. Конденсаторы с неорганическим диэлектриком

58. Н. П. Богородицкий, „Высокочастотные диэлектрики", Москва, 1938
59. J. Moscicki, E. T. Z, 1904, № 25, S. 527
60. В. Т. Ренне и В. Д. Алексеев, „Конденсаторы для кварцевых фильтров", Электросвязь, 1940, № 1, стр. 33.
61. В. Т. Ренне, „Точные слюдяные конденсаторы стабильной емкости" Труды Лен. Индустр. Инст., 1938, № 7, стр. 226—240.
62. П. Флоренский, М. Мантров и Д. Будницкий, „Электрическая крепость союзных слюд," Вестник Эл. техн., 1931, разд. III, № 5—6, стр. 68—83.
63. М. Мантров, „О влиянии пятнистости на диэлектрические потери в слюде", Вестн. Эл. пром., 1935, № 1, стр. 38—41
64. А. В. Толвинская и М. М. Михайлов, „Влияние пятнистости на электрические свойства слюды", ИЭСТ, 1940, № 4—5, стр. 67
65. В. Т. Ренне и А. В. Мухлынин, „Высокочастотный слюдяной конденсатор малого габарита", Сборник „Электрическая Изоляция", 1940, вып. III, стр. 86.
66. A. Thiessen, „Recent developments in mica condensers", Gen. Radio, Exper., 1933, vol. 7, № 8, p. 1—4
67. H. Curtis, „Mica condensers, as standards of capacity", Bull. of the Bur. of. St., 1910, vol. 6, № 3, p. 431
68. Е. И. Михайлова, Установка для нанесения серебра на слюду вакуумным способом, Инф. Техн. Бюлл. НИИЗ4, 1940, № 1, стр. 62
69. W. Griffiths, „The temperature Compensation of condensers," Wireless Eng., 19f42, vol. 19, № 222, p. 101
70. В. Т. Ренне и А. В. Мухлынин, „Слюдяные конденсаторы типа СЭ". Инф. техн. Бюлл. НКС, 1939, № 1, стр. 33
71. В. Т. Ренне и А. Д. Куприянов, „Пластмасса с повышенными электрическими свойствами", Вестн. Эл. пром., 1939, № 6
72. Л. А. Голубева, „Вакуумные слюдяные конденсаторы", Измерит. Техника, 1941, № 1
73. В. Т. Ренне и А. В. Мухлынин, „Магазины емкости", Электричество, 1938, № 10, стр. 52
74. „Магазины сопротивления, емкости и затухания", Инф. Бюлл. НКС, 1939, № 12, стр. 9.
75. В. Т. Ренне и А. В. Мухлынин. „Слюдяные конденсаторы стабильной емкости", ИЭСТ, 1937, № 7, стр. 52.
76. М. А. Жилинский, Порог ионизации в слюдяном конденсаторе, ИЭСТ, 1936, № 7. стр. 66
77. F. Gerth, H. Gönningen, „Die neue Entwicklung des Glimmerkondensators", E. T. Z, 1929, № 32, S. 1156
78. J. Maloff, „Mica condensers in high frequency cirquits", Proceed. of the Inst. Radio Eng., 1932, vol. 20, № 4, p. 64
79. М. А. Жилинский, „К расчету слюдяных конденсаторов", Вестн. Эл. Пром., 1930, № 1—2, стр. 52
80. М. Менковский, „Сера", Техническая энциклопедия, 1933, том 20, стр. 518—531
81. Aerovox Corpor.; General El. Review, 1942, vol. 45, № 5, p. 304

82. В. В. Наумов, „Высоковольтные конденсаторы связи“, ИЭСТ, 1936, № 3, стр. 24
83. W. Regerbis, „Hochspannung Porzellankondensatoren“, Telefunken Zeitung, 1930, № 54, Bd. 11, S. 16
84. E. Albers-Schönberg, A. Ungewiss, „Keramische Kondensatorbaustoffe mit erhöhter Dielektrizitätskonstante“, Hochf. T. und El. Ak., 1936, № 3, S 95
85. G. Straimer, W. Zincke, „Hochfrequenz-Isolierstoffe“, A. T. M., 1936, № 56, Z. 940—2
86. H. Handreck, „Keramische Isolierstoffe für Hochfrequenz“, Z. der V. D. I. 1934, Bd. 78, № 50, S. 1441
87. L. Navias, „Compositions and properties of some high titania ceramics“, I. Am. Ceramic. Soc., 1941, vol. 24, p. 148
88. L. Rigterink, „Improved ceramic dielectric materials“, Rev. of Sc. Instr., 1941, vol. 12, № 11, p. 527
89. H. Handreck, „Keramische Hochfrequenzkondensatoren“, A. T. M, 1936, № 62, T—112
90. P. Coursey, „Thermal stability of condensers“, The Wireless Eng., 1938, vol. 15, № 176, p. 247
91. H. Chase, „Resistors and condensers in mass production“, Electronics, 1939, vol. 12, № 9, p. 28
92. Н. П. Богородицкий, „Твердый диэлектрик с большой диэлектрической постоянной“, Электричество, 1935, № 9, стр. 24
92а. Г. И. Сканави, Вестник Электропром., 1944, № 4, стр. 7; 1945, № 6, стр. 17
92б. Г. А. Смоленский, „Тиглин — керамический материал с малой температурной зависимостью ε“, Журн. Техн. Физ., 1945, том XV, вып. 3, стр. 173.
93. G. Weber, „Die Abhängigkeit der Glimmspannung von Kondensatoren von der Frequenz“, Funktechn. Monatshefte, 1937, № 11, S. 338
94. Н. П. Богородицкий и И. Д. Фридберг, „Радиотехническая керамика“, Инф. техн. бюлл. НИИ,34, 1940, № 1, стр. 5
95. Н. П. Богородицкий, „Керамические массы — основной материал в производстве радиотехнических деталей“, Сборник „Новые материалы и заменители в электропромышленности“, ГЭИ, 1944, стр. 26—32.
96. Н. П. Богородицкий, „Высокочастотные конденсаторы из тиконда“, ИЭСТ, 1937, № 3, стр. 44—47, Эл-во; 1946, № 11, 50.
96а. Г. А. Смоленский, „Подстроечные и переменные керамические конденсаторы“, Вестн. Эл. Пром., 1945, № 6, стр. 19
96б Д. М. Казарновский, „Цирконовые малогабаритные конденсаторы“, Вестн. Электропром., 1945, № 6, стр. 20.

Г. Конденсаторы с органическим диэлектриком

97. В. Т. Ренне, „Свойства непропитанной конденсаторной бумаги“, Бум. Пром., 1934, № 1, стр. 51
98. В. Т. Ренне, „Конденсаторная бумага пониженной толщины“, Бум. Пром., 1937, № 5, стр.52
99. В. Т. Ренне, и М. С. Карпова, „Отечественная конденсаторная бумага пониженной толщины“, Бум. Пром., 1939, № 11, стр. 45
100. H. Race, R. Hemphill, H. Endicott, „Important properties of electrical insulating papers“, Gen. El. Rev., 1940, vol. 43, № 13, p. 492
101. В. Т. Ренне и Л. Н. Дольников, „Зольность конденсаторной бумаги“, Бум. Пром., 1938, № 2, стр. 52
102. В. Т. Ренне, „Структурные дефекты конденсаторной бумаги“, Бум. Пром., 1938, № 12, стр. 31
103. В. Т. Ренне, „Проводящие включения в конденсаторной бумаге“, Бум. Пром., 1941, № 1, стр. 31
104. В. Т. Ренне, „Конденсаторная бумага из древесной целлюлозы“, Вестн. Эл. пром., 1938, № 8, стр. 30

105. Ю. В. Корицкий и др., „Применение сульфатцеллюлозной бумаги в производстве статических конденсаторов", Вести. Эл. Пром., 1938, № 8,
106. Л. А. Журина, „Старение тряпичных и сульфатцеллюлозных бумаг" Вестн. Эл. Пром., 1938, № 6, стр. 33.
107. В. Т. Ренне, „Теплостойкость конденсаторной бумаги", Бум. Пром., 1941, № 3, стр. 24
108. P. Clark, „Pyrochemical behaviour of Cellulose Insulation", El. Engineering, 1935, № 10, p. 1088
109. G. Kohman, „Cellulose as an insulating material", Ind & Eng. Chem., 1939, vol. 31, № 7, p. 807 (ind. edit.).
110. А. Ф. Вальтер и др., „Термическая устойчивость пропиточных составов для бумажных конденсаторов", ИЭСТ, 1937, № 8, стр. 53
111. В. Т. Ренне, „Применение хлоридов нафталина для целей пропитки", И. Э. С. Т., 1934, № 4, стр. 65.
112. Р. Б. Холодовская и др., „О применении галовакса в производстве автотракторного оборудования", Вестн. Эл. Пром., 1937, № 2, стр. 42
113. S. Morgan, W. Yaeger, „Dielectric properties of organic compounds", Ind. & Eng. Chem., 1940, vol. 32, № 11, p. 1519 (ind. edit.)
114. В. Т. Ренне, „Стабильность емкости бумажных конденсаторов", Сборник Электрическая изоляция, 1940, вып. III, стр. 33
115. D. M[c] Lean, L. Egerton, G. Kohman, M. Brotherton, „Paper dielectrics containing chlorinated impregnants", Ind. & Eng. Chem., 1942, vol. 34, № 1, p. 101 (ind. edit.), 1946, vol. 38, № 8 и 11.
115a. D. M[c] Lean, L. Egerton, „Paper capacitors, containing chlorinate impregnants", Ind. & Eng. Chem., 1945, vol. 37, № 1, p. 73 (ind. edit.
116. В. Т. Ренне и Л. Г. Шляхтер, „Олеовакс—новый диэлектрик" Инф. Бюлл. НКС., 1940, № 2, стр. 36
117. А. Ф. Вальтер и др., „Механизм поляризации некоторых кристаллических соединений", Ж. Т. Ф., 1940, том 10, № 23—24, стр. 1970
118. М. М. Морозов, „Освоение производства статических конденсаторов", Труды 3-й конференции по Эл. Изолир. Матер., 1934, стр. 105
119 В. Л. Скипетров, „Масло для конденсаторов", Сборник Электрич. изоляция, 1937, вып. 1, стр. 97
120. „Совол", под редакцией К. А. Андрианова и Е. Сидоровой, ОНТИ, 1938
121. К. А. Андрианов и Е. Сидорова, „Новая изоляционная жидкость — совол", Вестн. Эл. пром., 1936, № 11, стр. 37
122. М. Г. Герценштейн и С. Соколова, „Бумажно-соволовые конденсаторы", Вестн. Эл. Пр., 1938, № 12, стр. 35; Электричество, 1939, № 3
122a. L. Berberich, C. Fields, R. Marbury, „Characteristics of chlorinated impregnants", Proceed. IRE, 1945, vol. 33, № 6, p. 389
123. Б. М. Тареев и Г. Рабчинская, „Касторовое масло, как диэлектрик", Вести. Эл. Пр., 1939, № 10—11, стр. 37
124. Е. И. Михайлова, „Фильтровые бумажные конденсаторы, пропитанные в касторовом масле", Вестн. Эл. Пр., 1944, № 1—2, стр. 15
125. E. Halls, „Electrical Impregnating Process", Ice and Cold Storage; 1937, 40, p. 165
126. H. Jakobi, O. Schneider, F. Schumann, „Enstörungs Kondensatoren für hohe technische Anforderung". Siemens Zeitschr., 1938, Bd. 18, № 1, S. 7
127. А. Ф. Вальтер и Л. Д. Инге, „О компаунде для бумажной изоляции высоковольтных конденсаторов", Электричество, 1936, № 4
128. Maddison, Chapmann, „Fernsprechkondensatoren", El. Nachricht Wesen, 1931, № 1, S. 40
129. В. Т. Ренне, „Алюминиевая фольга для конденсаторов", Легкие металлы, 1937, № 4, стр. 22
130. G. Mansbridge, „Manufacture of electrical condensers", J. I. E. E. 1908, vol. 41, № 192, p. 535
130a. „Selfhealing paper condensers", Wireless World, 1945, vol. 51, № 7, p. 204

131. В. Т. Ренне, „Расчет бумажного парафинированного конденсатора", Вестн. Эл. Пром., 1931, № 8, стр. 347
132. Н. В. Князев, „Расчет бумажных конденсаторов", Инф. Техн. Бюлл., № 42, НКЭП, 1941, ИТБ Слаб. Т. Пр.
133. В. Т. Ренне, „Электрические свойства и производство бумажных парафинированных конденсаторов", Вестн. Эл. Пром., 1931, № 8, стр. 347
134. В. Т. Ренне и А. В. Мухлынин, „Рационализация производства бумажных конденсаторов", Вестн. Эл. Пр., 1940, № 8, стр. 56
135. А. М. Кугушев, „Бумажно-масляный конденсатор", И. Э. С. Т., 1932, № 7—8, стр. 14
136. В. Т. Ренне и И. С. Стипаков, „Бумажные конденсаторы для симметрирования междугородних телефонных кабелей", И. Э. С. Т., 1932, № 7—8, стр. 3
137. L. Linder, „Neuzeitliche Kondensatoren der Nachrichtentechnik und ihre Entwicklung", E. T. Z., 1940, Bd. 61, №№ 42—43
138. A. Bolsterli, „Pressgas als Isolation in Hochspannungsapparaten", Bull. Ass. Suisse des El, 1931, № 11, S. 245
139. В. Т. Ренне, „Старение бумажных парафинированных конденсаторов", Вестн. Эл. Пр., 1943, № 6, стр. 11
140. В. Т. Ренне и Л. Г. Шляхтер, „Исследование автомобильных конденсаторов", Вестн. Эл. Пр., 1941, № 4, стр. 21
141. L. Linder, J. Schniedermann, „Das Verhalten von Papierwickel Kondensatoren bei höheren Frequenzen", Z. f. Fernmeldetechn., 1937, № 5, S. 73
142. В. Т. Ренне, „Электрическая прочность бумажного конденсатора", И. Э. С. Т., 1933, № 1, стр. 51
143. А. Ф. Вальтер и Л. Д. Инге, „Разработка низковольтных бумажных конденсаторов", И. Э. С. Т., 1937, № 5—6, стр. 52; № 7, стр. 47
144. Л. А. Фоменко, „Специальные проходные конденсаторы для защиты от индустриальных помех", Инф. Бюлл. НКС, 1940, № 3, стр. 1
145. В. Т. Ренне, „Бумажные конденсаторы с жидкой пропиткой", А. Н. СССР, Выбор системы тока для эл. ж. д., вып. 1; Конденсаторные двигатели, 1941.
146. E. Borniiz, „Starkstrom-Kondensatoren", AEG-Mitt., 1938, № 3, S. 108
147. P. Hochhäusler, „Der Phasenschieber-Kondensator", E. T. Z., 1938, Bd. 59, № 18, S. 457
148. The Electrical Review, 1937, vol. CXX, № 31003, p. 722
149. Б. Л. Айзенберг и др., „Проектирование и приемка в эксплоатацию статических конденсаторов 6 kV", Эл. станции, 1938, № 5, стр. 20
150. Б. Л. Айзенберг, „Выбор рациональной схемы включения статических конденсаторов", Эл. станции, 1938, № 2, стр. 38; Эл. монтер, 1939, № 5, стр. 20
151. С. К. Медведев, „О правильной эксплоатации статических конденсаторов", Эл. монтер, 1939, № 5, стр. 21
152. С. К. Медведев, „Сопротивление для разряда конденсаторов", Вестн. Эл. Пр., 1939, № 1, стр. 21
153. С. К. Медведев, „Предохранители для статических конденсаторов", Вестн. Эл. Пр., 1940, № 7, стр. 41
154. С. А. Лебедев, „Применение сериесных статических конденсаторов для электропередачи Москва — Куйбышев", Бюлл. ВЭИ, 1940, № 7, стр. 23
155. R. Marbury, „Water cooled capacitors", El. Journal, 1939, № 2, p. 75
156. E. Eby, „New Carrier Current Coupling Capacitors", El. Engineering, 1935, № 8
157. W. Wastensen, „Kopplungskondensatoren", Ericsson Review, 1935, № 3
158. „Der Moderne Kopplungs- Kondensator", E. T. Z., 1935, № 7

159. S. Silberman, „Elektrische Kondensator in der Bauart eines Kabels", E. T. Z., 1926, № 45, S. 1339
160. Л. Инге и Н. Мандрыка, „Высоковольтные конденсаторы", Труды 3-й Конф. по эл. из. материалам, 1934, стр. 252.
161. М. Г. Герценштейн, „Влияние температуры и напряжения на емкость статических конденсаторов", Вестн. Эл. Пр., 1941, № 7—8, стр. 34
162. М. Г. Герценштейн, „Соволовые статические конденсаторы", Вестн. Эл. пр., 1942, № 9
163. В. Т. Ренне и Ф. И. Абрамович, „Применение ацетилцеллюлозы в качестве диэлектрика в конденсаторах", Труды 3-й конф. по эл. изолир. матер., 1934, стр. 145
164. Н. П. Богородицкий и В. И. Малышев, „Полистирол в технике высоких частот". И. Э. С. Т., 1937, № 11, стр. 50
165. H. Nottebrock, „Neues über Widerständen, Kondensatoren und Spulen", Siem. Zeitschr., 1938, Bd. 18, № 7, S. 329
165a. General Electric Review, 1943, vol. 46, № 12

Д. Электролитические конденсаторы

166. H. Nottebrock, „Ein Kondensator mit der Kapazität von 1 Farad", Siem.-Zeitschr. 1940, Bd. 20, № 6, S. 259
167. Güthe, Phys. Rev., 1902, vol. 15, p. 527
168. Müller. Konopicky, Z. f. Phys. Chem., 1929, Bd. 141, № 5—6, S. 343
169. Dobias, Z. S. f. Phys., 1930, Bd. 61, S. 852; Bd. 65, S. 859
170. A. Güntherschulze. H. Betz, „Elektrolyt-Kondensatoren", Berlin, 1937 (русский перевод, 1938, Оборонгиз), библиография: 230 назв.
171. A. Güntherschulze, Z. f. Phys. Chem., 1929, Bd, 143, № 1
172. Simon, Yauch; Z. f. El. Chem. Ang. Phys. Chem., 1935, Bd. 41, № 10, S. 739
173. P. M[c] Knight Deeley, „Electrolytic Capacitors", 1938, USA
174. S. Lilienfeld, Tr. Am. El. Chem. Soc., 1932, vol. 61, p. 531
175. C. Wachenhusen, „Frequenzgang und Ersatzbild des Elektrolyt Kondensators" Hochfr. Techn. und El. Ak., 1941, Bd. 57, № 5
176. А. А. Петровский, „Влияние состава анодного алюминия на качество электролитических конденсаторов", И. Э. С. Т., 1938, № 1, стр. 49
177. А. А. Петровский, „К вопросу о снижении удельных объемов электролитических конденсаторов", И. Э. С. Т., 1938, № 4—5
178. Л. Н. Закгейм и др., „К вопросу об увеличении удельной емкости анодной фольги для электролитических конденсаторов", И. Э. С. Т., 1939, № 4, стр. 54
179. N. Schnoll, „Etched foil electrolytics", Electronics, 1937, May, p. 32
180. В. Т. Ренне, „К постановке производства электролитических конденсаторов", И. Э. С. Т., 1934, № 2, стр. 67
181. Г. Жиров, В. Сафонов и П. Скоморохов, „Электролитические конденсаторы и их производство", Оборонгиз, 1940
182. G. Peck, „Fabricated plate capacitors", Electronics, 1938, vol. 11, № 9, p. 60
183. В. Т. Ренне, „Сухие электролитические конденсаторы", Электричество, 1935, № 7, стр. 33
184. В. Т. Ренне, „Производство электролитических конденсаторов в СССР" (Дополнение к переводу книги А. Гюнтершульце и Г. Бетц, „Электролитические конденсаторы", Оборонгиз, 1938). Библиография: 41 назв.
185. В. Т. Ренне и Л. Г. Шляхтер, „Исследование процесса оксидирования анодов для электролитических конденсаторов", Ж. Т. Ф., 1936, т. 6, № 10, стр. 1705
186. Л. Н. Закгейм и Г. Николаева, „Динамическая формовка алюминия для электролитических конденсаторов", И. Э. С. Т., 1938, № 7, стр. 57

187. O. Bücking, „Über Elektrolyt-Kondensatoren" und ihre Herstellung", E. T. Z., 1937, № 4, S. 91
188. P. Coursey, „Electrolytic condensers", London, 1939
189. „Regulating condensers", Radio Engineering, 1936, vol. 16, № 10, p. 11
190. Л. Н. Закгейм и Г. Николаева, „Регулирующие электролитические конденсаторы", И. Э. С. Т., 1940, № 9
191. В. Т. Рение и А. В. Мухлынин, „Американские сухие электролитические конденсаторы". И. Э. С. Т., 1934, № 8, стр. 51
192. Г. Николаева и А. Н. Цикин, „Электрические характеристики современных электролитиков", Ам. Техн. и Пром., 1938, № 8, стр. 386
193. С. С. Гутин, „Морозостойкий электролитический конденсатор", И. Э. С. Т., 1939, № 5, стр. 53
194. Л. Н. Закгейм, „Тепловой расчет электролитического конденсатора", Ж. Т. Ф., 1940, том 10, № 21, стр. 1762
195. W. Van Geel, A., Claassen „Elektrolyt-Kondensatoren", Philipps Techn. Rundsch., 1938, № 3, S. 65
196. P. Coursey, S. Ray, „Electrolytic condensers", J. I. E. E., 1939, vol. 35, № 511, p. 107 (библиография: 100 назван.)
197. C. Lomont, F. Dunleavey, „The AC-Electrolytic Capacitors". El. Engineering, 1935, vol. 54, № 10, p. 1058
198. F. Godsey, „Power losses in electrolytic condensers", Q. Tr. of A. I. E. E., 1932, vol. 51, № 2, p. 439
199. В. С. Тверцын и И. И. Морозов, „Электролитические конденсаторы переменного тока", И. Э. С. Т., 1937, № 11, стр. 42
200. Л. Н. Закгейм и Г. Николаева, „Электролитические конденсаторы для пуска однофазных электродвигателей", Вести. Эл. Пр., 1936, № 10, стр. 19
201. Л. Н. Закгейм и А. Годес, „Электролитические конденсаторы переменного тока", И. Э. С. Т., 1940, № 7, стр. 62
202. Л. Г. Годес, С. С. Гутин, „Электролитические конденсаторы с металлизированной тканью", Журн. Техн. Физ., 1945, том XV, № 10, стр. 718
203. A. M. Georgiev, „The electrolytic Capacitor", 1945, New York

Редактор *Д. Л. Оршанский*

Сдано в набор 9/XII-1946 г. Подписано к печати 27 V-1947 г. 14,1 у.-а. л. 12 п. л.
Бумага 60×92. Тираж 5.000 экз.
М 03874

Тип. № 2 Управления издательств и полиграфии Ленгорисполкома

ОПЕЧАТКИ

Страница	Строка	Напечатано	Должно быть
15	8 снизу	$E = 4\pi\frac{D}{E}$	$\varepsilon = 4\pi\frac{D}{E}$
54	4 снизу	$2.\ 10^{-6}$	$-2 \cdot 10^{-6}$
90	8 сверху	$44 \times 40 \times 14$ *мм*	$64 \times 40 \times 14$ *мм*

Р е н и е. Электрические конденсаторы. Зак. № 5682

Цена 15 р.